

第四篇 同步电机之

第十二章

同步电机的基本理论和运行特性

授课教师：花为

东南大学电气工程学院电机与电器系

Email: huawei1978@seu.edu.cn

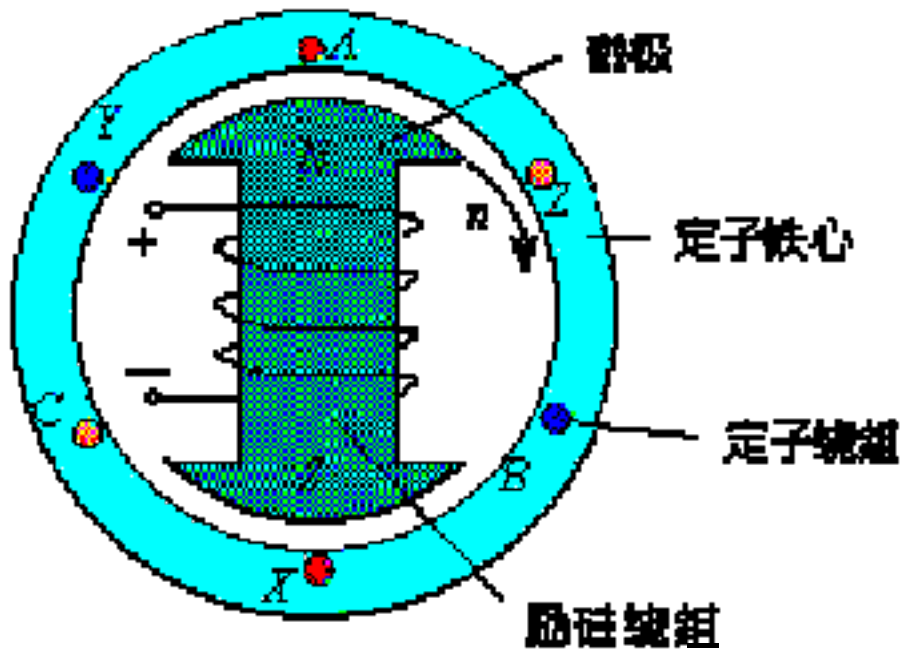
http://ee.seu.edu.cn/te_187.htm

第十二章

同步电机的基本理论与运行特性

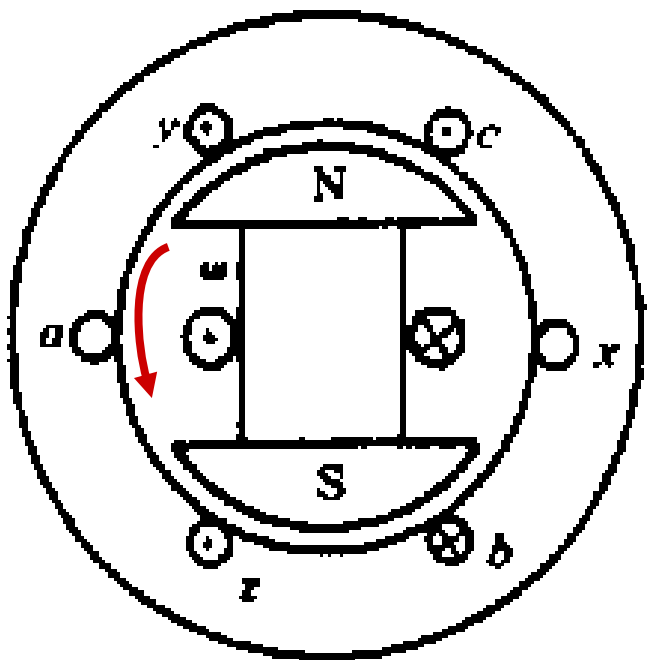
- 同步电机的结构
- 同步电机的励磁系统 *
- 同步电机的空载运行 ✓
- 对称负载时的电枢反应 ✓
- 隐极同步发电机的分析方法
- 凸极同步发电机的分析方法
- 电枢绕组的漏抗
- 同步发电机的空载、短路和负载特性
- 同步发电机的参数及测定
- 同步发电机的稳态运行特性

回顾同步电机的原理



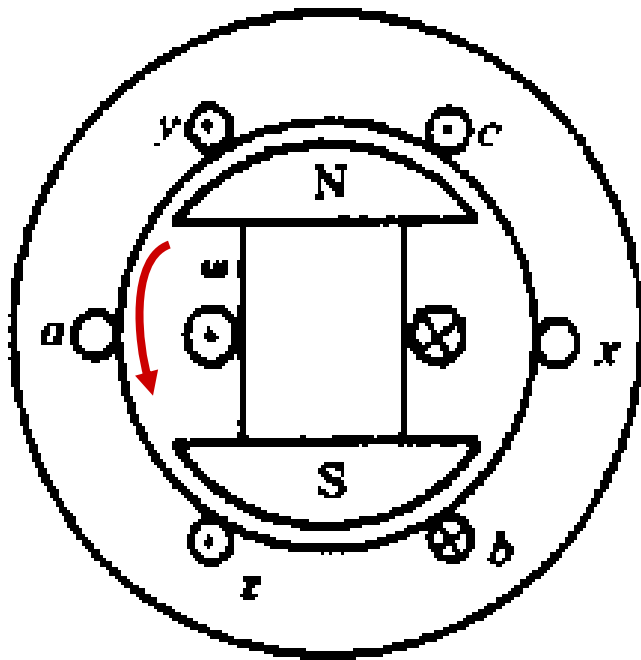
- 定子上嵌放有**对称**三相绕组**a-x**、**b-y**、**c-z**
- 转子绕组通以**直流**电流形成分布磁场，匝链定子上的各相绕组

设磁场在气隙中按正弦分布

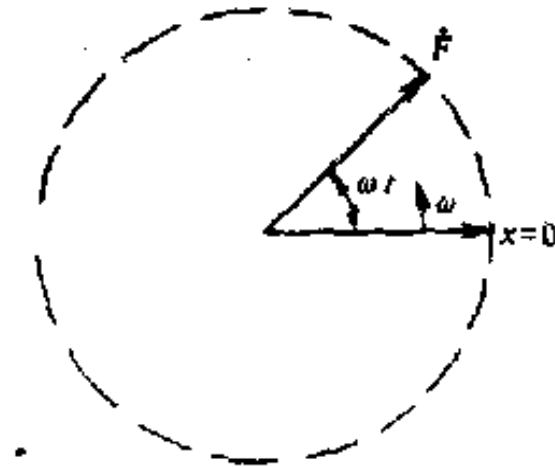


- 转子以恒定速度旋转
- 定子绕组中所匝链的磁通按正弦规律变化，其感应电势按正弦规律变化
- 由于各相匝数相等，从而各相电势的大小相等，由于各相绕组空间分布彼此相距 120° ，从而三相电势时间相位差 120° ，满足了三相电势对称的要求
- 原动机拖动电机转子旋转，则为同步发电机

当对称的三相电流流过对称的三相绕组时，合成磁势为一旋转磁势



圆形旋转磁势



- 定子绕组磁势产生的气隙圆形旋转磁场与转子励磁产生的磁场有相同的极对数，磁极相互吸引，驱动转子旋转——同步电动机

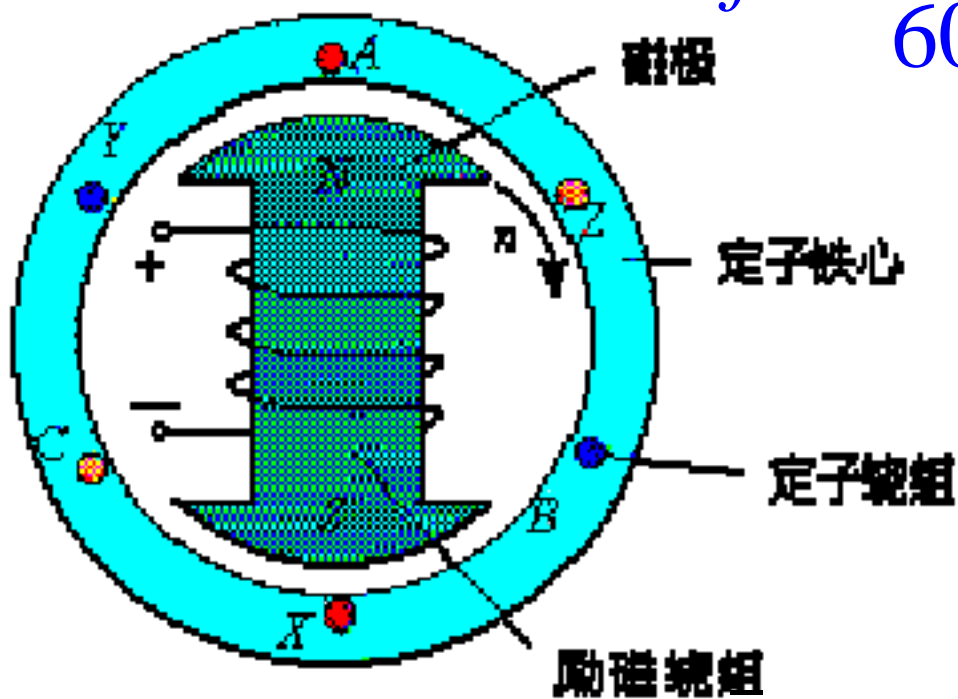
发电机原理

- 主磁场的建立：励磁绕组通以直流励磁电流，建立极性相间的励磁磁场，即建立起主磁场。
- 载流导体：三相对称的电枢绕组充当功率绕组，成为感应电势或者感应电流的载体。
- 切割运动：原动机拖动转子旋转（给电机输入机械能），极性相间的励磁磁场随轴一起旋转并顺次切割定子各相绕组（相当于绕组的导体反向切割励磁磁场）。
- 交变电势的产生：由于电枢绕组与主磁场之间的相对切割运动，电枢绕组中将会感应出大小和方向按周期性变化的三相对称交变电势。通过引出线，即可提供交流电源。

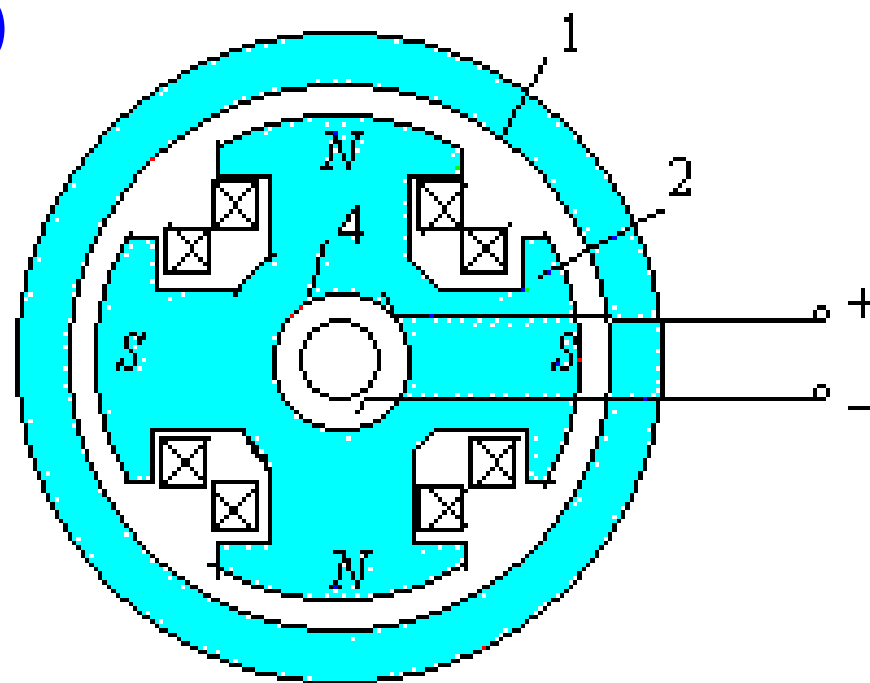
发电机原理

- 感应电势频率：感应电势的**频率**决定于同步电机的**转速** n （转/分钟）和**极对数** p ，即：

$$f = \frac{pn}{60}$$



$p = 1$



$p = 2$

同步转速

- **同步转速**：从供电品质考虑，由众多同步发电机并联构成的交流电网的频率应该是一个不变的值，要求发电机的频率应该和电网的频率一致。我国电网的频率为**50Hz**，故有：

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p}$$

- 发电机的转速必须为某些固定值——**同步转速**。例如**2极**电机的同步转速为**3000r/min**，**4极**电机的同步转速为**1500r/min**，依次类推。只有运行于同步转速，同步电机才能正常运行。

电动机原理

- 将同步电机定子绕组接至三相交流电源，频率为 f 的三相交流电流将在电机气隙中产生转速为同步转速 n_1 的旋转磁场
- 在一定条件下旋转磁场将吸住转子磁极一起旋转，它们有相同的转速和转向——无相对运动
转子转速为同步转速 $n = 60f/p$
- 同步电动机的功率因数可以调节，在不要求调速的场合，应用大型同步电动机可以提高运行效率。近年来，小型同步电动机在变频调速系统中开始得到较多地应用。

1. 同步电机的结构

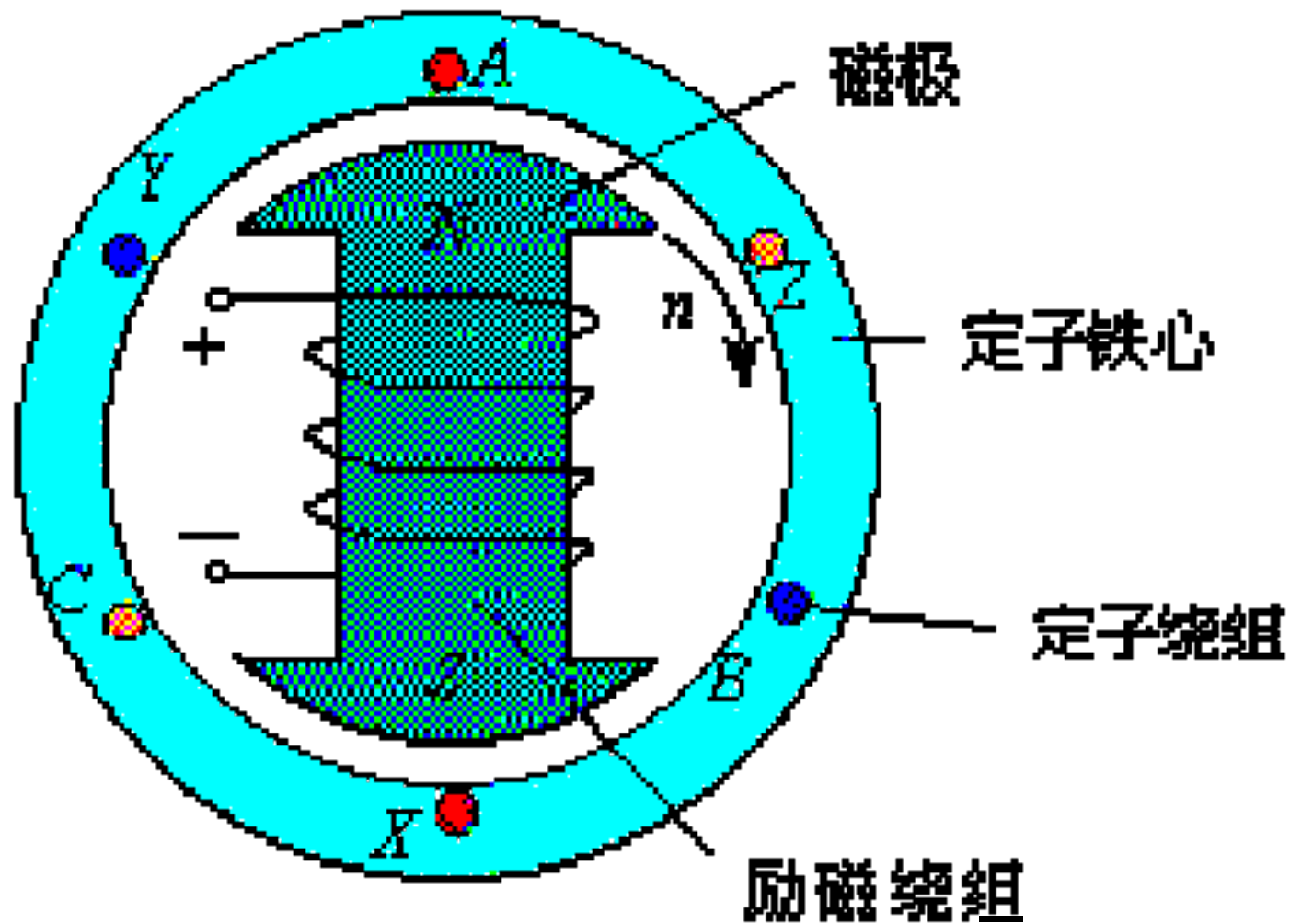
同步电机的型式与构造

- 基本结构型式
- 构造特点
- 额定值

基本结构型式

- 组成：固定的**定子**和可旋转的**转子**
- 分类：旋转**磁极式**和旋转**电枢式**
 - **旋转磁极式**—以**电枢**为**定子**，**磁极**为**转子**。使**磁极**旋转，**励磁电流**通过**集电环**送入**励磁绕组**
 - **旋转电枢式**—以**磁极**为**定子**，**电枢**为**转子**（小容量或者同步电机的交流励磁机）。使**电枢**旋转，**电枢电流**通过**转子轴**上的**旋转整流器**整流后，直接为同步电机**转子励磁线圈**供电

例：旋转磁极式同步电机

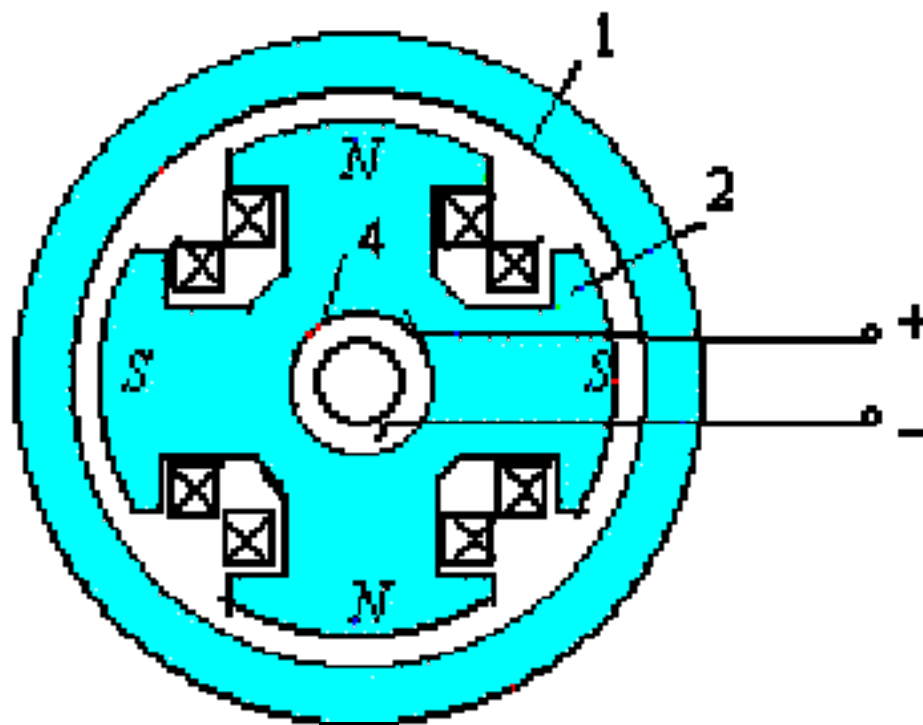


定子、转子、气隙

- **定子**—定子铁心的内圆均匀分布着定子槽，槽内嵌放着按一定规律排列的**三相对称交流绕组**。这种同步电机的定子又称为**电枢**，定子铁心和绕组又称为电枢铁心和电枢绕组。
- **转子**—转子铁心上装有制成一定形状的成对磁极，**磁极上绕有励磁绕组**，通以**直流电流**时，将会在电机的气隙中形成**极性相间**的分布磁场，称为**励磁磁场**（也称**主磁场、转子磁场**）。
- **气隙**—气隙处于电枢内圆和转子磁极之间，**气隙层的厚度和形状**对电机内部磁场的分布和同步电机的性能有重大影响。

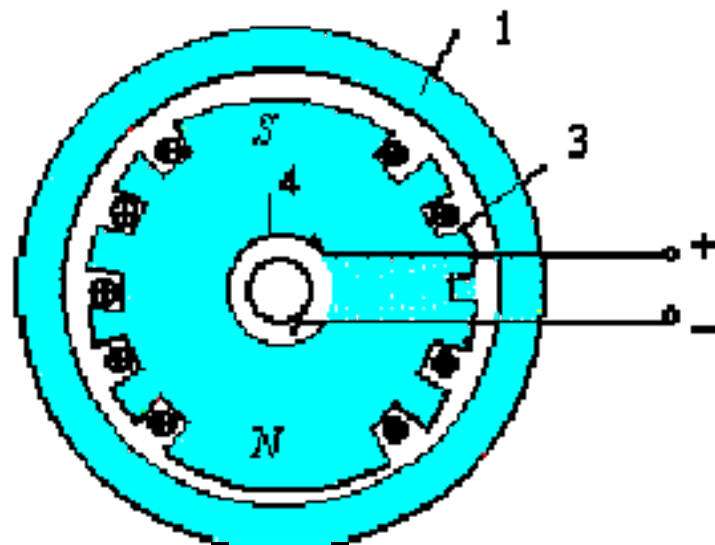
凸极式转子

- ▶ 凸极式转子上有明显凸出的**成对磁极**和**励磁线圈**
- ▶ 当励磁线圈中通过直流励磁电流后，每个磁极就出现一定的极性，相邻磁极交替为**N**极和**S**极
- ▶ 对**水轮发电机**来说，由于**水轮机**的转速较低，要发出工频电能，发电机的极数就比较多，做成凸极式结构工艺上较为简单。**中小型同步电机多半也做成凸极式**



隐极式转子

- 隐极式转子上没有凸出的磁极
- 沿着转子本体圆周表面开有槽，这些槽中嵌放着励磁绕组。在转子表面约1/3部分没有开槽构成**大齿**，是磁极的**中心区**
- 励磁绕组通入励磁电流后，沿转子圆周也会出现 **N** 极和 **S** 极
- 在大容量高转速汽轮发电机中，转子圆周线速度极高，最大可达**170米/秒**。为了减小转子本体及转子上的各部件所承受的巨大离心力，大型汽轮发电机都做成**细长的隐极式圆柱体转子**



汽轮发电机

- 以汽轮机或燃气轮机为原动机。汽轮机的运行性能在高速时较为经济，应有尽可能高的转速。火电站中汽轮发电机一般为两极隐极式，原子能电站的大型汽轮发电机一般采用4极隐极式
- 定子——与异步电机相同，定子铁心由0.35mm或0.5mm或其它厚度的电工钢片叠成。定子外径较小时，采用圆形冲片，当定子外径大于1m时，采用扇形冲片
- 转子——隐极式转子，其外形常做成一个细长的圆柱体为了减少高速旋转引起的离心力。转子铁心表面圆周上铣有许多槽，励磁绕组嵌放在这些槽内。励磁绕组为同心式绕组，以铜线绕制，并用不导磁的槽楔将绕组紧固在槽内

汽轮发电机

- **转轴**——经联轴器与汽轮机相联的一端为**汽机端**，称与励磁机相接的一端为**励磁机端**
- **集电环**——励磁绕组的两个**出线端**，通过装在励磁机侧的**集电环**经**电刷**与直流励磁电源接通

汽轮发电机图





汽轮发电机组

水轮发电机

- **特点**：极数多，直径大，轴向长度短，呈扁短形。大多数水轮发电机为**立式**
- **定子铁心**：水轮发电机直径很大，定子铁心由**扇形电工钢片**拼装叠成，且留有径向通风沟以满足散热需要
- **定子绕组**：每槽内只有一线棒，称单层绕组。为改善电压波形，常采用**分数槽绕组**
- **转子磁极**：由厚度为**1~2mm**的钢片叠成；磁极两端有磁极压板，用来压紧磁极冲片和固定磁极绕组。有些发电机磁极的极靴上开有一些槽，槽内放上铜条，并用端环将所有铜条连在一起构成**阻尼绕组**，其作用是用来**抑制短路电流**和**减弱电机振荡**，在电动机中作为起动绕组用

水轮发电机图



同步电机铭牌

- 额定容量 S_N (VA, kVA, MVA等)：发电机出线端的额定视在功率；额定功率 P_N (W, kW, MW等)：发电机输出的额定有功功率，对同步电动机而言，是指转轴上输出的有效机械功率
- 额定电压 U_N (V, kV等)：额定时定子输出端线电压
- 额定电流 I_N (A)：指额定运行时定子的线电流
- 额定功率因数 $\cos\theta_N$ ：额定运行时的功率因数
- 额定效率 η_N ：额定运行时的效率
- 额定转速 n_N 和额定频率 f_N ：额定运行时电机的转速，即同步转速 (r/min) 和电枢输出端电能的频率，我国标准工业频率规定为50Hz
- 同步电机名牌上还有其它的运行数据，如额定负载时的温升、励磁电压 U_{fN} 和励磁电流 I_{fN} ，定子绕组连接方式等

同步电机铭牌

➤我国生产的汽轮发电机有**QFQ**、**QFN**、**QFS**等系列。前两个字母表示汽轮发电机；第三个字母表示冷却方式，**Q**表示氢外冷，**N**表示氢内冷，**S**表示双水内冷

➤系列：**TS**系列，**T**表示同步，**S**表示水轮

举例：**QFS-300-2** 表示容量为**300MW**双水内冷**2**极汽轮发电机。**TSS1264/160-48**表示双水内冷水轮发电机，定子外径为**1264**厘米，铁心长为**160**厘米，极数为**48**

➤外同步电动机系列有**TD**、**TDL**等，**TD**表示同步电动机，后面的字母指出其主要用途。如**TDG**表示高速同步电动机；**TDL**表示立式同步电动机。同步补偿机为**TT**系列

思考题

- 为什么同步电机不能有任意的转速？
- 如何从外形上区分汽轮发电机和水轮发电机？
- 定子电枢绕组安排的基本要求——各相绕组感应电势对称

2. 同步电机的励磁系统

- 基本概念
- 励磁要求
- 励磁方式
- 励磁系统

I 基本概念

- **励磁电流**：转子励磁绕组中通入的**直流励磁**电流，以便建立磁场
- **励磁方式**：同步电机获取**直流励磁**电流的方式
- **励磁系统**：供给励磁电流的整个系统，包括装置和线路
 - 励磁机
 - 励磁调节器（手动、自动）
 - 灭磁装置

II 对励磁系统的要求

- 正常运行时，供给励磁电流
- 为维持端电压或电网电压值，随负载情况变化，励磁电流能相应调节（**AVR-automatic voltage regulator**）
- 当系统电压严重下降时（如发生短路故障等），能强行励磁提高电势，保持电压稳定
- 突然丢负荷时，如水轮机组转速明显升高，能强行减磁，限制端电压过度增高

II 对励磁系统的要求

- 当电机内部发生短路故障时，能快速灭磁和减磁，以减小故障的损坏程度
- 对两台以上并列运行发电机，能成组调节无功功率，使无功合理分配
- 其他：反应迅速，运行可靠，结构简单，损耗小，成本低，体积小等

III 励磁方式

➤ 他励 ✓

- 由另外电源供电：

1. 直流发电机：直流励磁机励磁系统

2. 交流发电机+整流装置：交流励磁机整流励磁系统

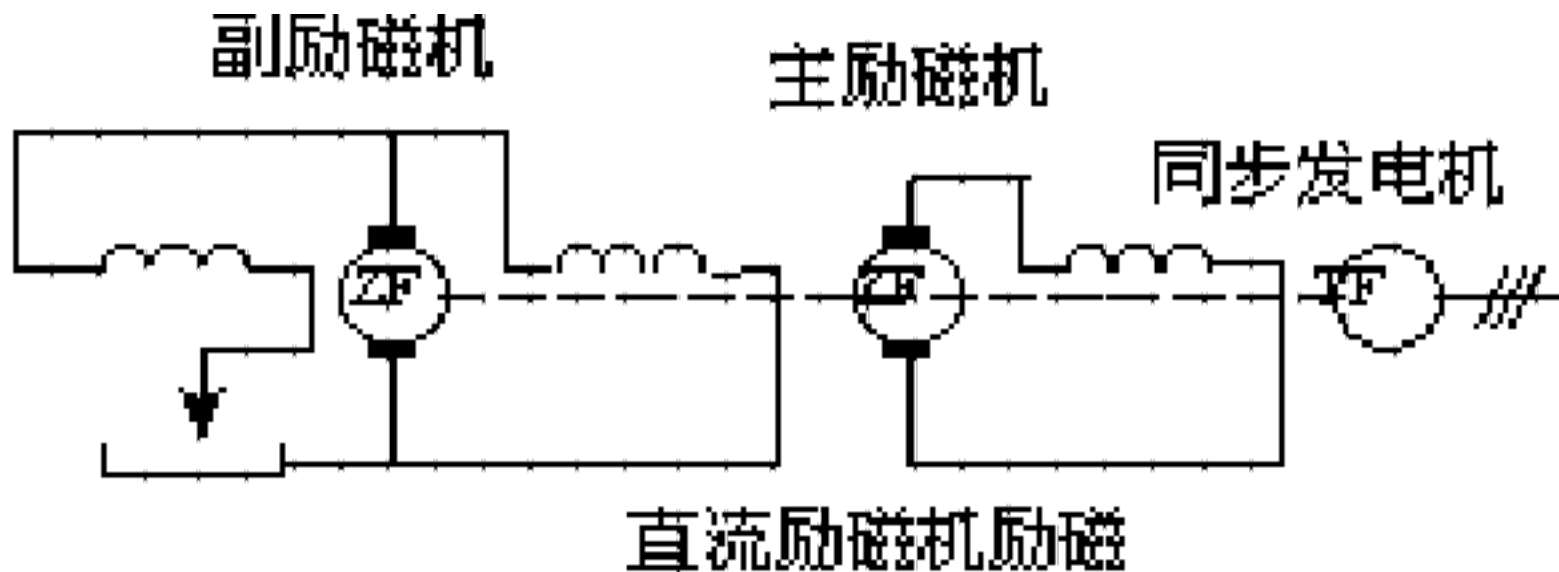
- 运动方式：同轴，独立工作

➤ 自励

- 自并励，自复励，谐波绕组励

III-1 直流励磁机励磁系统

- 直流励磁机通常与同步发电机同轴，采用并励或者他励接法，或采用负载电流反馈的复式励磁
- 采用他励接法时，励磁机的励磁电流由另一台被称为副励磁机的同轴直流发电机供给



III-2 交流励磁机整流励磁系统

➤ 采用交流励磁机与整流装置配合，根据整流装置的**放置位置**可分为：

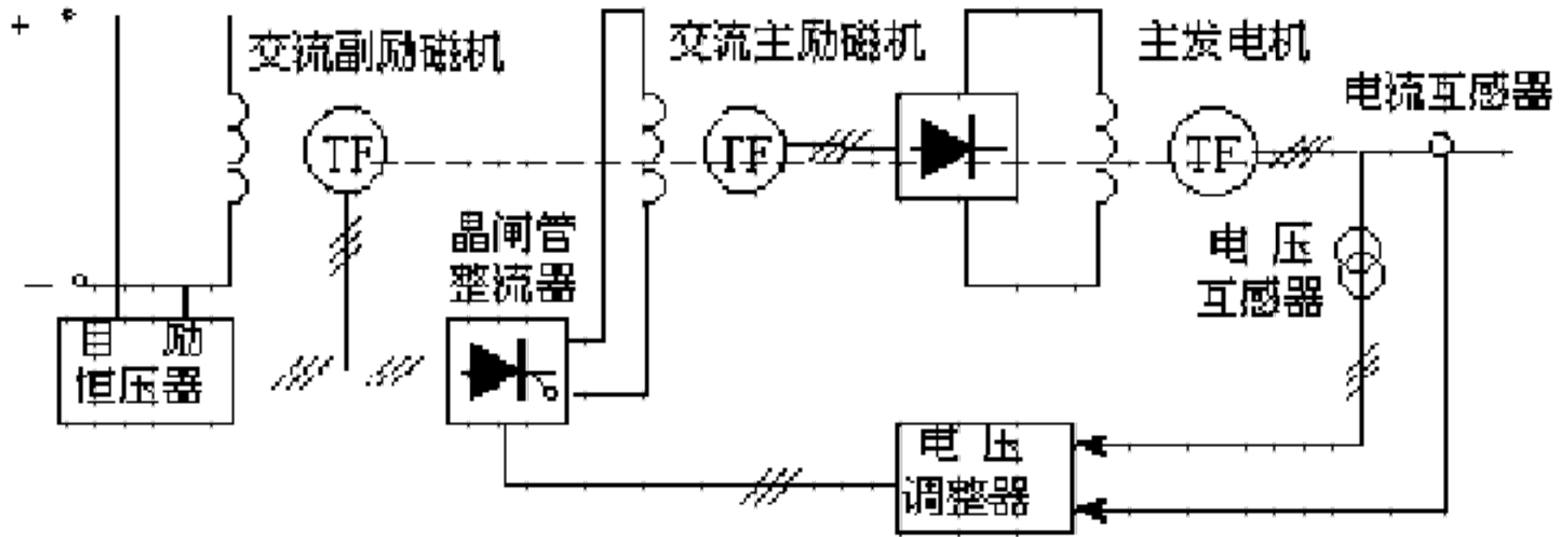
- 静止整流励磁

1. 他励式

2. 自励式

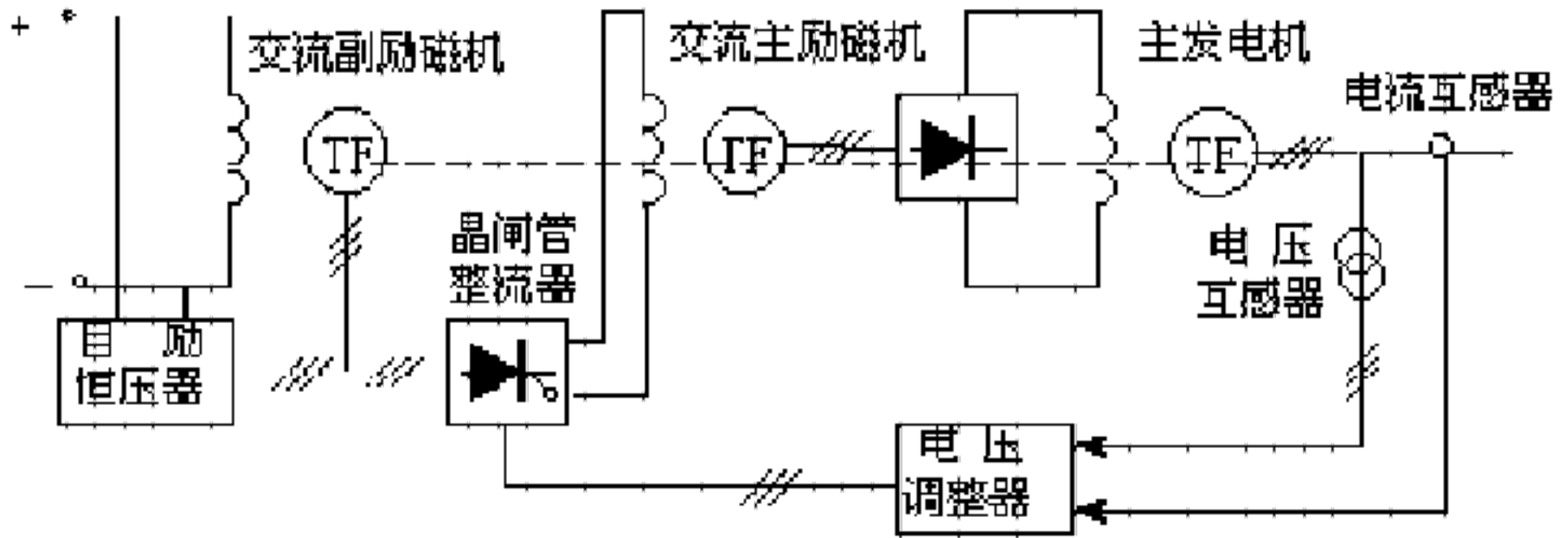
- 旋转整流励磁

他励式静止整流励磁



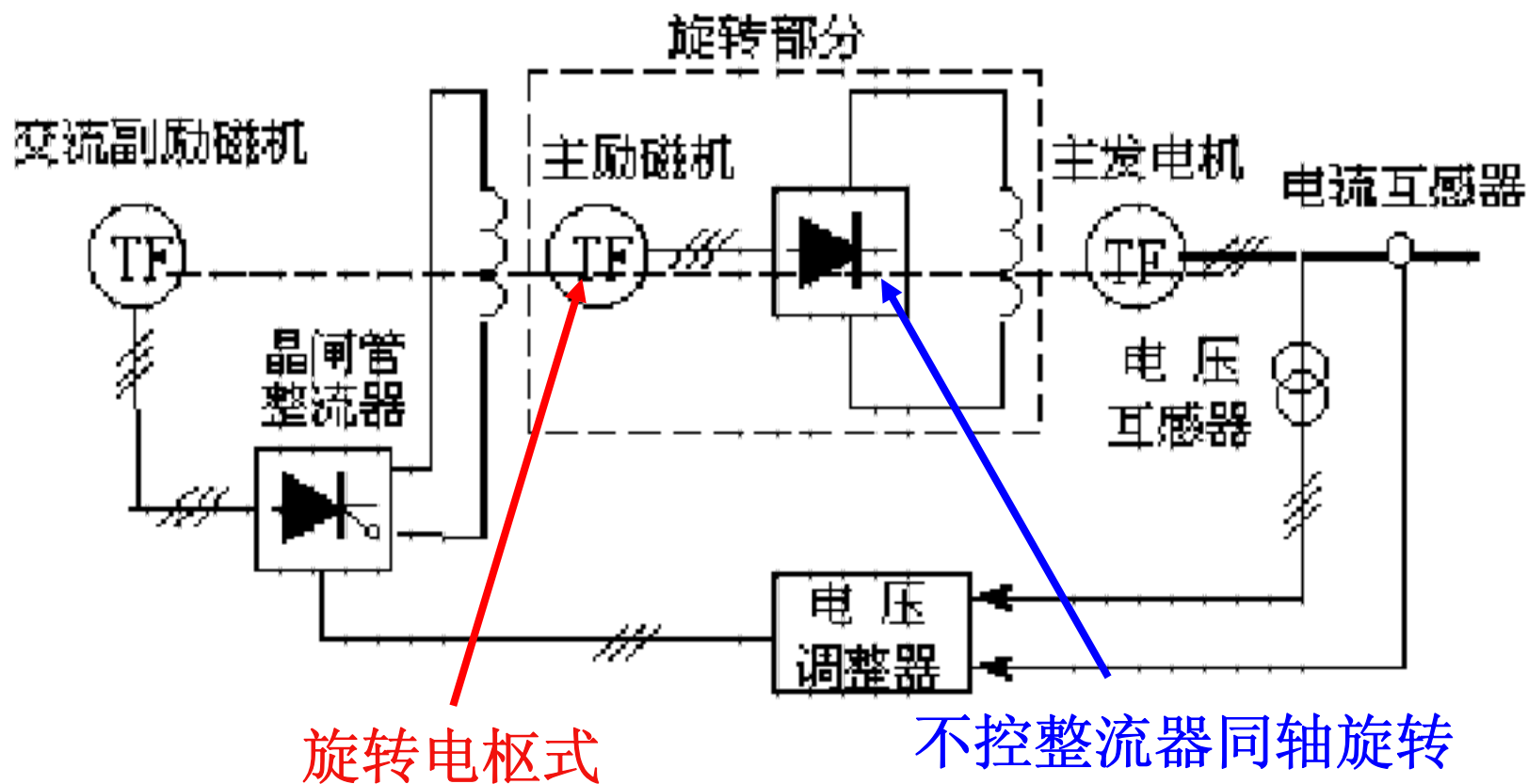
- 同一轴上有三台交流发电机，即主发电机、交流主励磁机和交流副励磁机
- 副励磁机的励磁电流开始时由外部直流电源提供，待电压建立起来后再转为自励 (有时采用永磁发电机)

他励式静止整流励磁



- 副励磁机的输出电流经过静止晶闸管整流器整流后供给主励磁机
- 主励磁机的交流输出电流经过静止的三相桥式硅整流器整流后供给主发电机的励磁绕组

旋转整流励磁



交流主励磁机采用旋转电枢式，旋转电枢的交流电经过与主轴一起旋转的不可控整流器整流后，直接送到发电机的转子励磁绕组用于励磁

3. 同步电机的空载运行

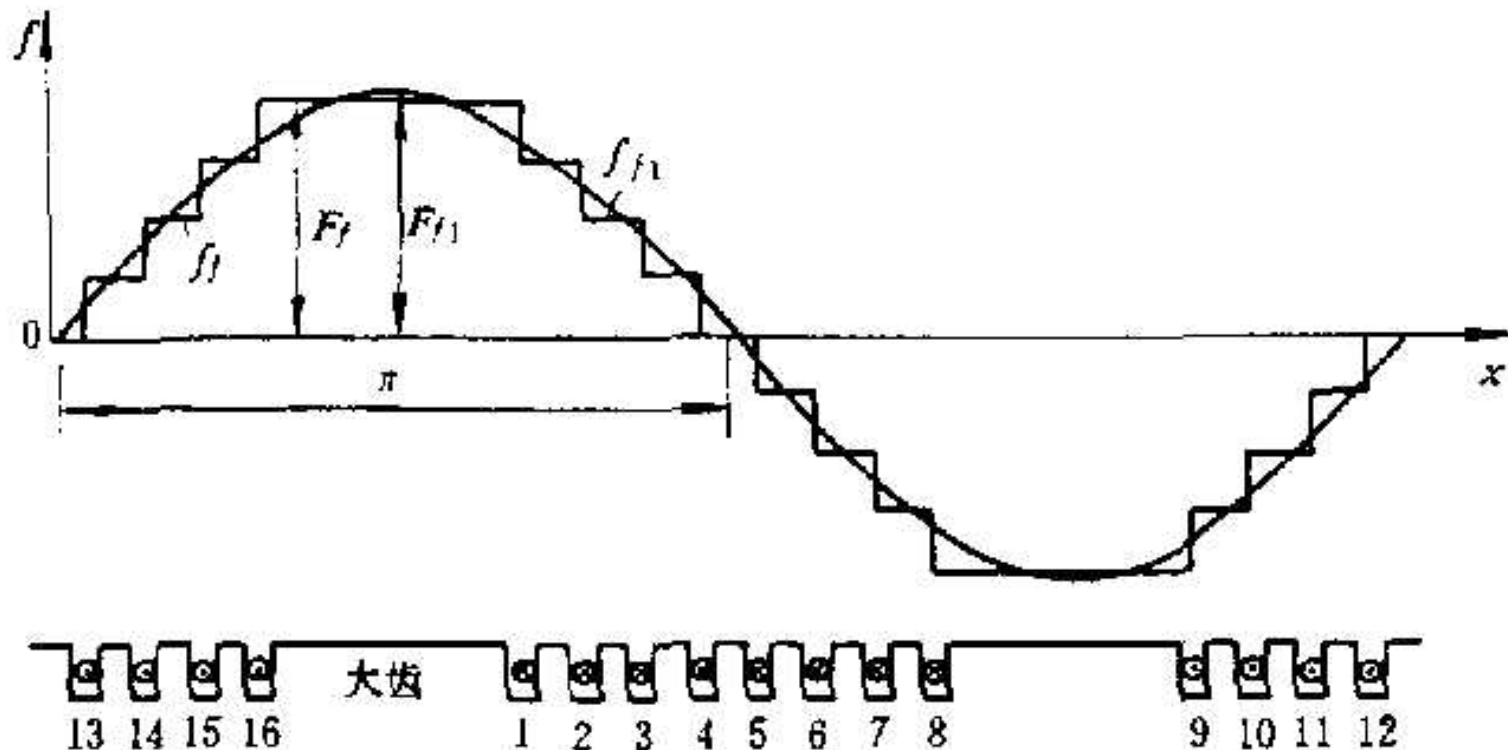
- 空载磁势
- 时间相量和空间矢量
- 空载电势
- 电压波形畸变

I 空载运行与空载磁势

- 空载运行：原动机带动发电机在同步转速下运行，励磁绕组通过适当的励磁电流，电枢绕组不带任何负载
- 空载运行是同步发电机最简单的运行方式，其气隙磁场由转子励磁磁势单独建立，分析较为简单

I-1 隐极式同步电机的空载磁势

- 励磁绕组（分布绕组）埋于转子槽内，沿转子圆周气隙近似均匀
- 励磁磁势在空间的分布为一个阶梯形，受齿槽的影响，气隙磁密呈现出波动变化

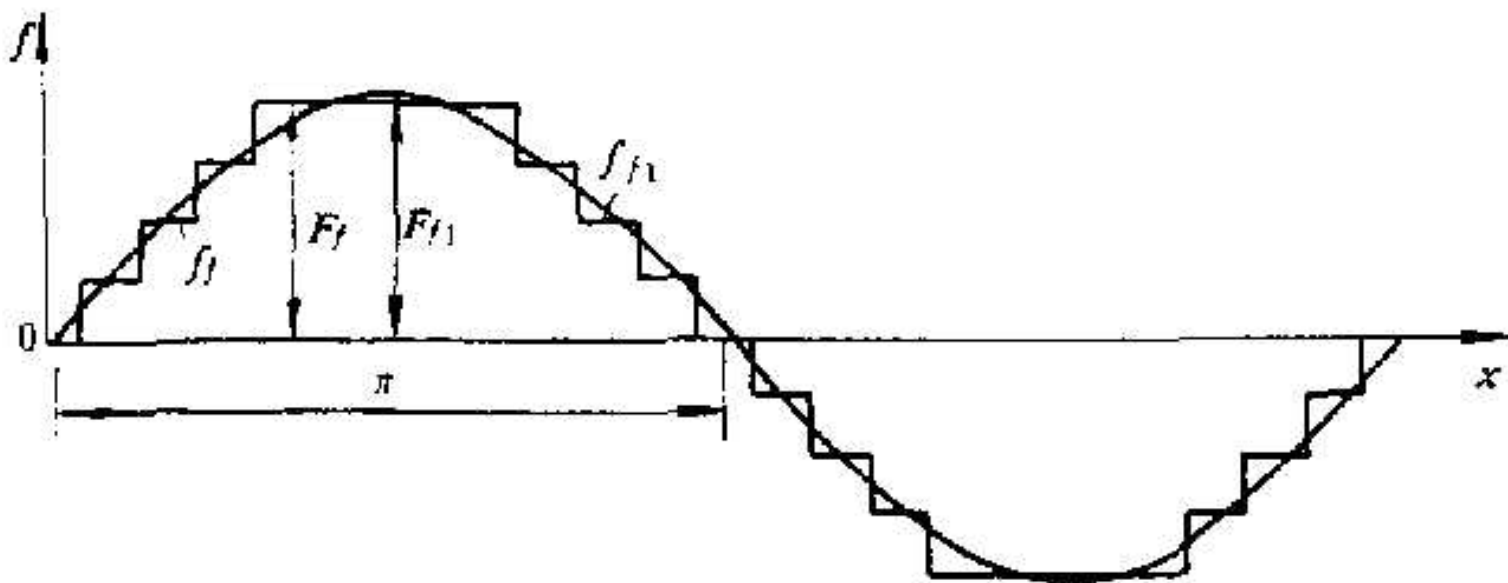


I-1 隐极式同步电机的空载磁势

- 用谐波分析法可求出其基波分量

$$\text{波形系数 } k_f = \frac{F_{f1}}{F_f} = \frac{F_{f1}}{I_f N_f}$$

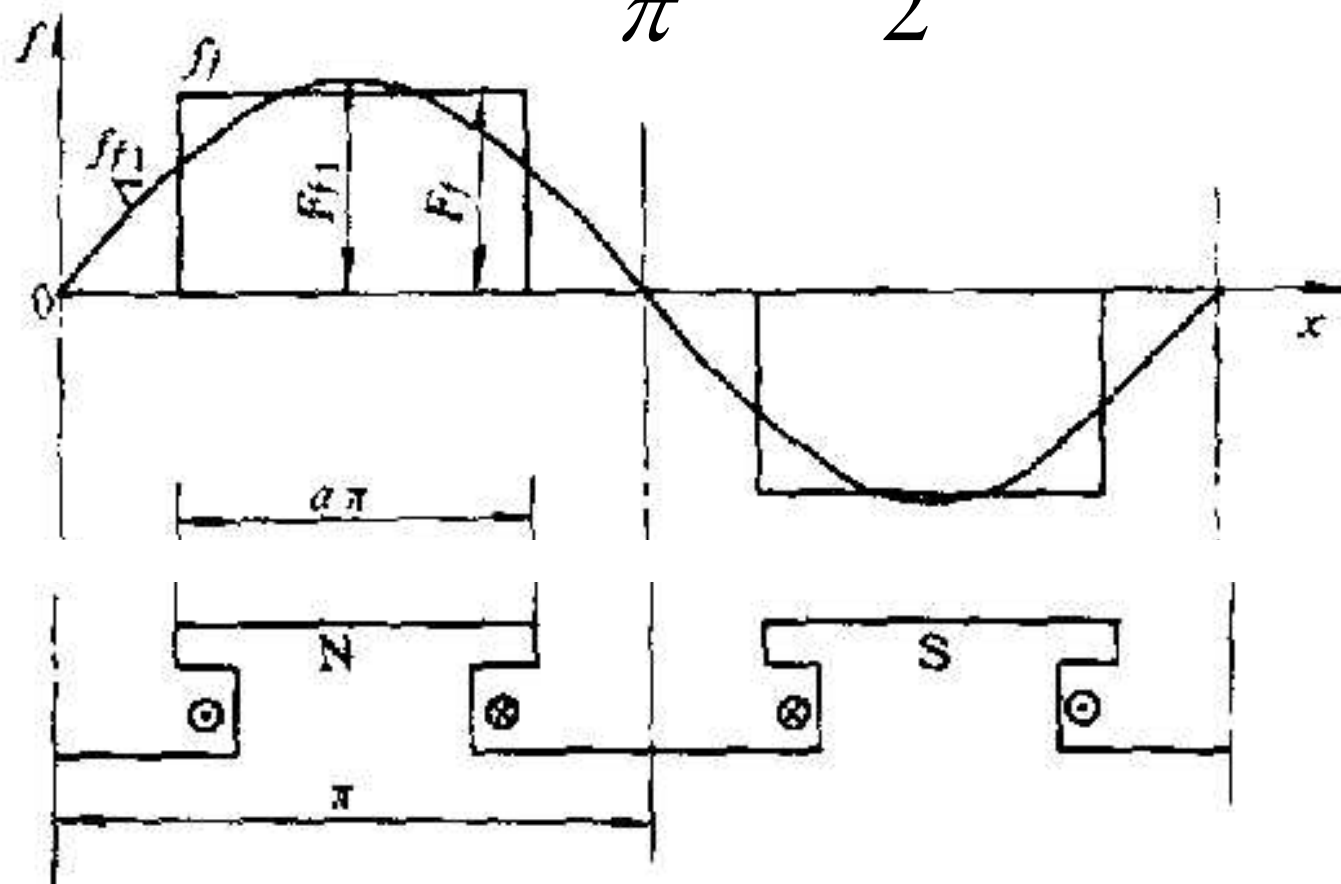
- 合理选择大齿的宽度可使气隙磁密的分布接近正弦波。如无特殊说明，以后仅考虑磁通密度的基波分量



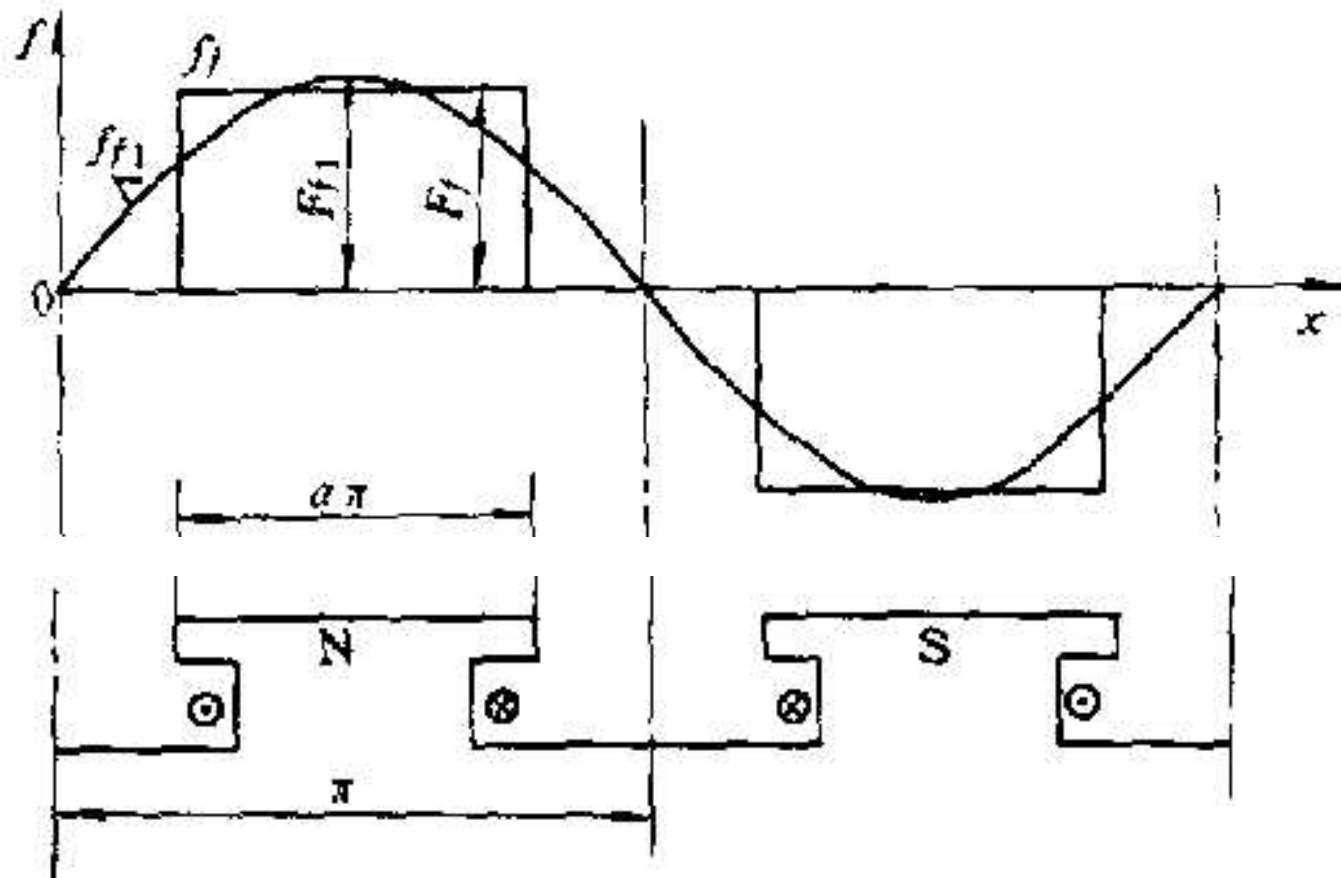
I-2 凸极式同步电机的空载磁势

- 励磁绕组为集中绕组，磁势波为矩形波

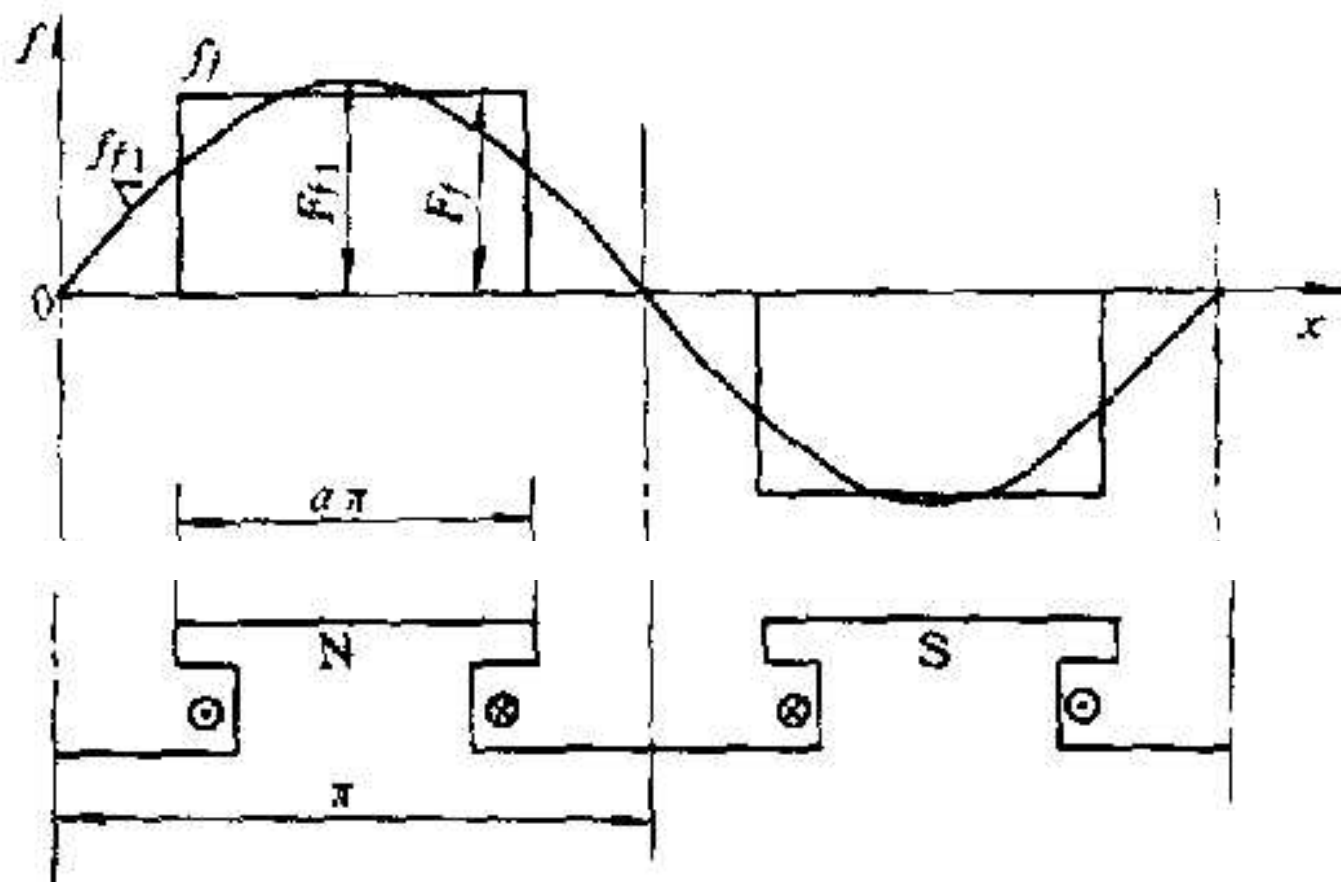
$$k_f = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\alpha \pi}{2}$$



- 对于凸极发电机来说，由于定转子间的气隙沿整个电枢圆周分布不均匀，极面下气隙较小，磁阻较小；极间气隙较大，极间磁阻很大。同一个极面下，气隙径向磁通密度的分布近似于平顶的帽形。极靴以外的气隙磁通密度减少很快，相邻两极中线上的磁通密度为零
- 气隙磁密用傅立叶谐波分析分解出空间基波和一系列谐波

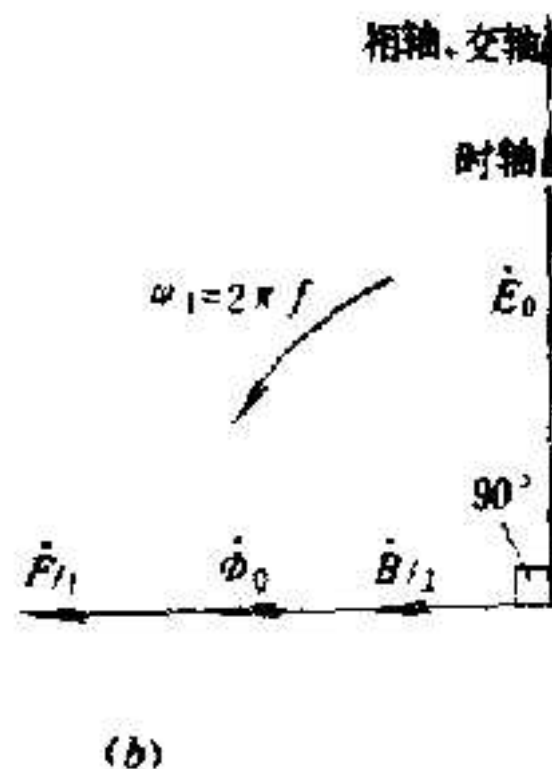
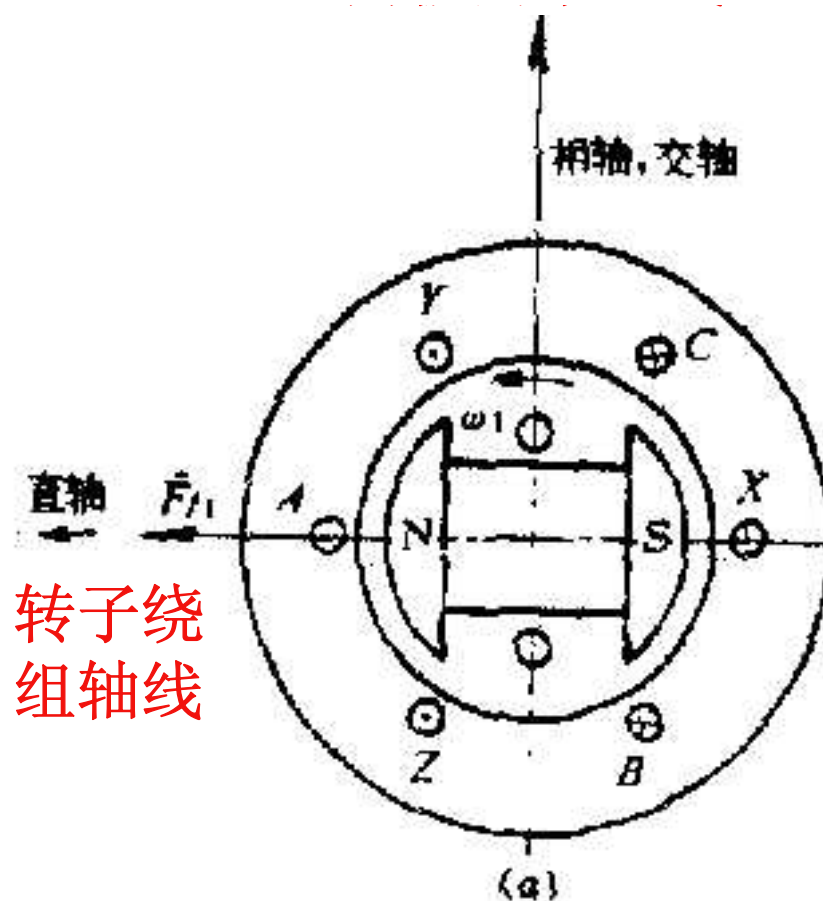


- 感应电势的波形和大小与气隙磁密的分布形状及幅值大小紧密相关
- 在设计和制造电机时，应采取适当的措施，以获得尽可能接近正弦分布的气隙磁密，从而得到较高品质的感应电势



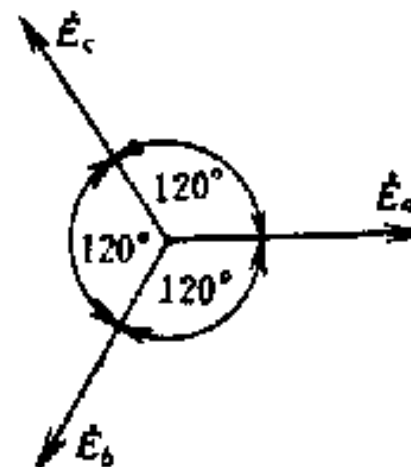
II 时间相量与空间矢量

- 空间矢量：磁势和磁通密度（随时间变化）
- 时间相量：电枢绕组匝链的磁通，感应电势、电压和电流

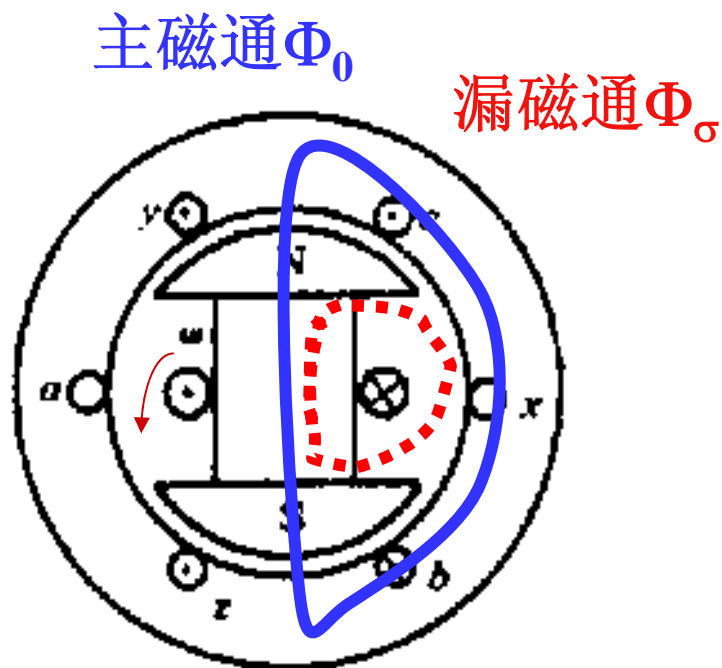


III 空载电动势相量

只有主磁通才在定子绕组中产生
感应电势 $E_0 = 4.44 f N_1 K_{N1} \Phi_0$

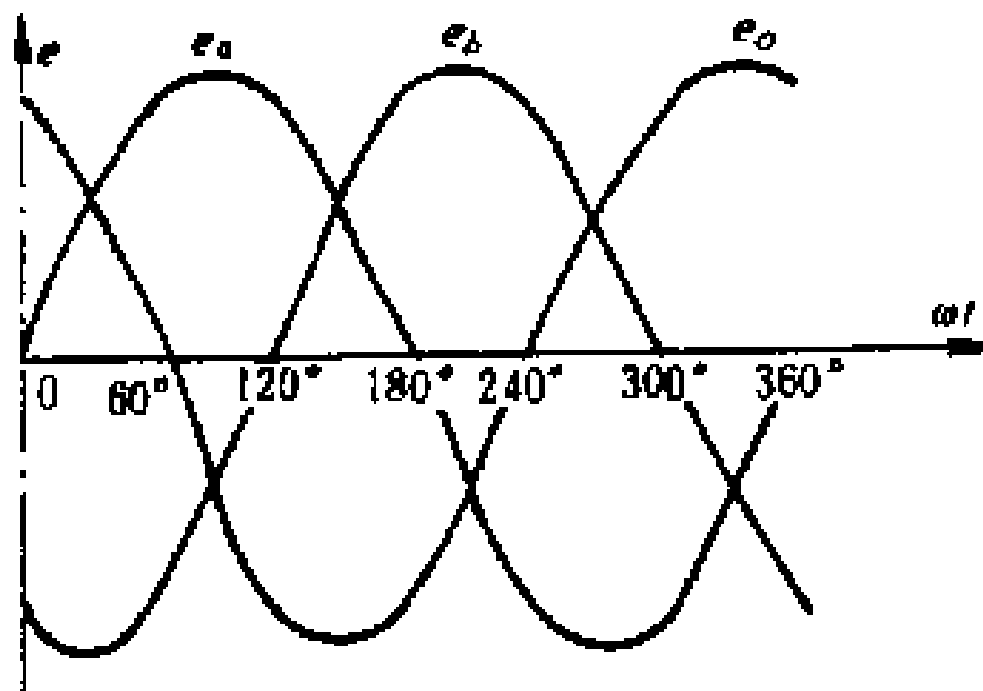


相量图



结构示意图

三相电势对称



IV 电压波形正弦畸变率

- **定义**：实际空载线电压波形与正弦波形的偏差程度

$$K_v = \sqrt{\frac{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \cdots + U_{mk}^2 + \cdots}{U_{m1}^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_{mn}^2}}{U_{m1}}$$

- **影响**：危害用电设备（瞬时电压值可大大超过额定电压），导致线路附加损耗，高频辐射影响通讯
- **规定**：空载及额定电压时，容量在**1000kVA**之上时不超过**5%**，较小容量不超过**10%**
- **措施**：使气隙磁密波形接近正弦波，定子采用分布和短距绕组，三相Y形接法消除三次及其倍数次谐波

4.对称负载时的电枢反应

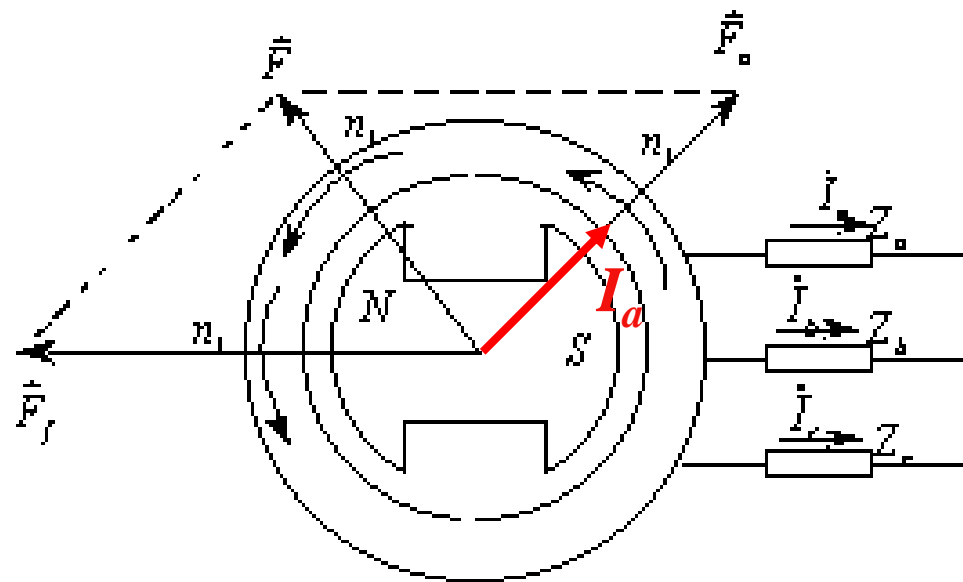
- $\psi = 0^\circ$
- $\psi = 90^\circ$
- $\psi = 180^\circ$
- $\psi = -90^\circ$
- 一般情况

电枢反应概念

- **电枢反应**：同步电机带上**对称负载**后，定子绕组流过**负载电流**，电枢绕组产生**电枢磁动势**和**电枢磁场**，使空气隙**励磁磁动势**和**励磁磁场**发生变化，从而影响绕组中的**感应电动势**
- **内功率因数角 ψ** ：空载电动势 E_0 和负载电流 I 之间的夹角
- **外功率因数角 θ** ：绕组端电压 U 和负载电流 I 之间的夹角

负载后气隙磁势分析

- 空载时只有一个以同步转速旋转的励磁磁势 F_f ，随轴同转的转子磁势（称为机械旋转磁势），在电枢绕组中感应出三相对称交流电势，励磁电势，即空载电势 E_0
- 当电枢绕组接上三相对称负载后，电枢绕组中流过三相对称的交流电流，形成一个以同步速度旋转的旋转磁势，电枢磁势 F_a —电枢旋转磁势（称为电气旋转磁势）
- 两个旋转磁势的转速均为同步速，且转向一致，二者在空间处于相对静止状态，矢量合成为一个合成磁势
- 气隙磁场：由合成磁势在电机气隙中建立起来的磁场
- 同步发电机负载以后，电机内部的磁势和磁场及绕组中感应电势将发生显著变化，此变化主要由电枢磁势的出现所致 — 电枢反应



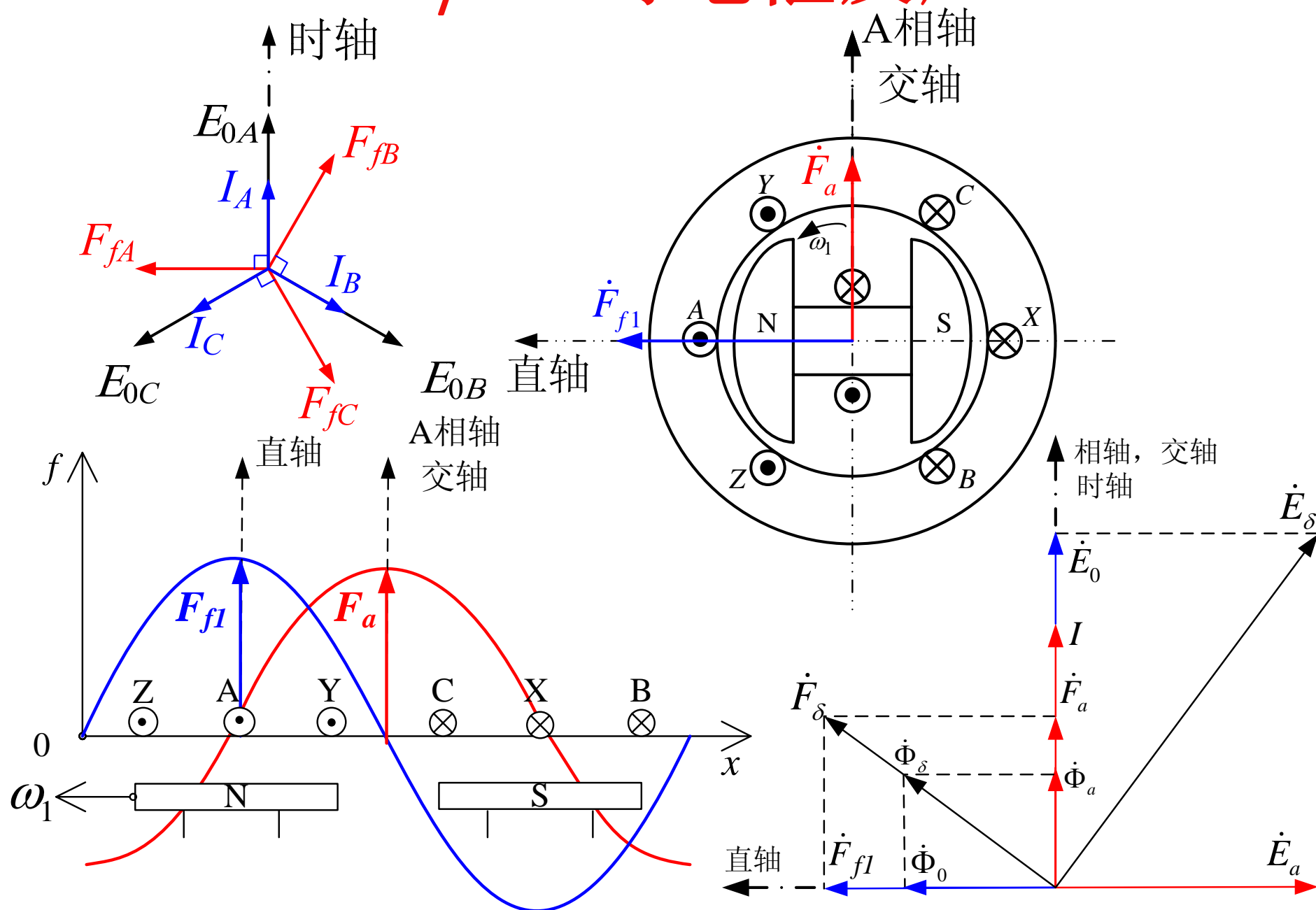
负载后电机中的旋转磁势

- **解释：**时间相量 I_a 与空间矢量 F_a 同向

电枢磁势 F_a —三相电流产生的合成磁势，哪一相电流达最大值，则位置在其绕组的轴线上；

A相电流 I_a —如 I_a 最大，则 I_a 在相轴上，此时 F_a 正好在交轴上

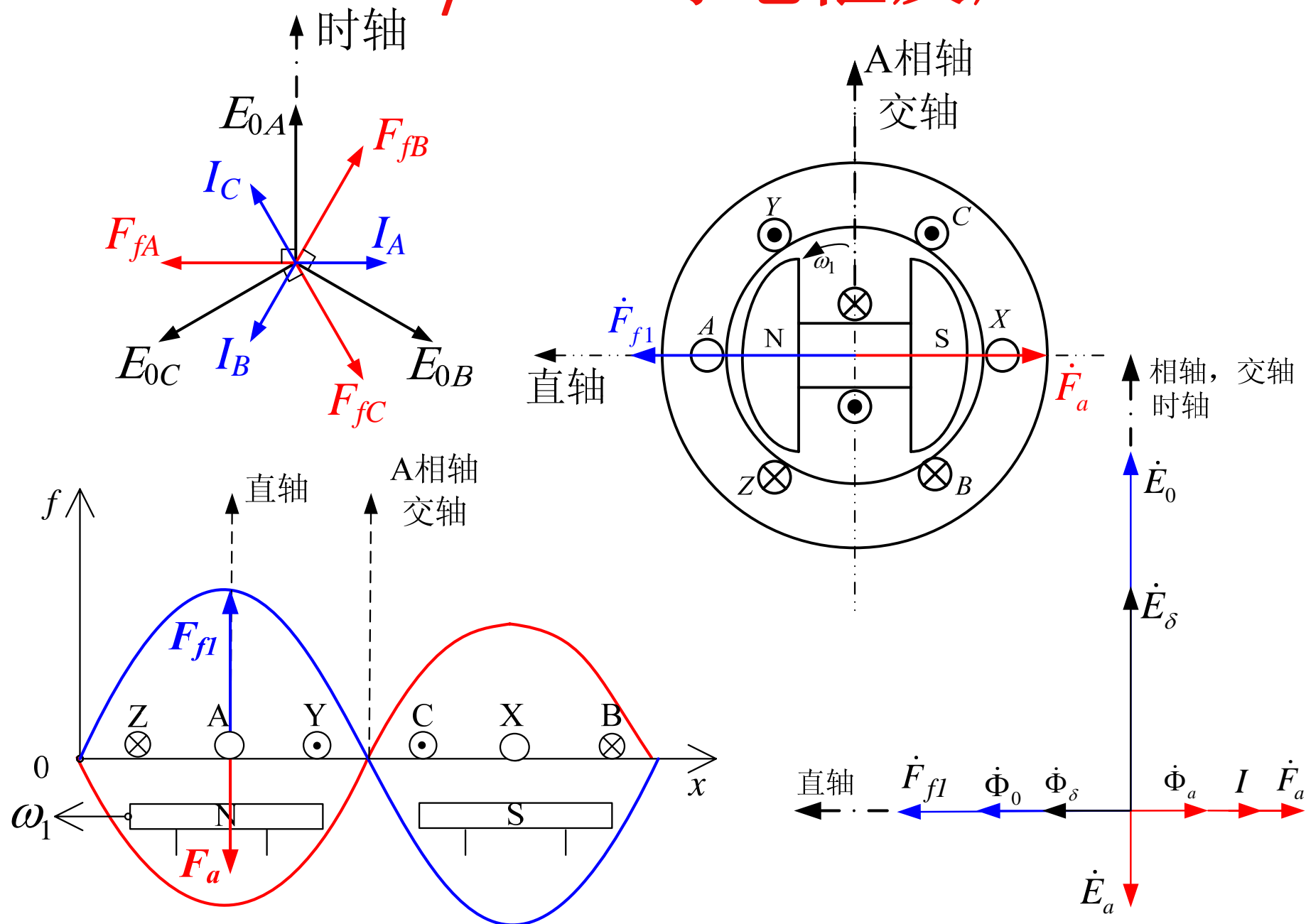
I. $\psi=0^\circ$ 时电枢反应



I. $\psi=0^\circ$ 时电枢反应

- 转子励磁磁势在直轴上，电枢反应磁势作用在交轴上，电枢反应的结果使得合成磁势的轴线位置产生一定的偏移，幅值发生一定的变化
 - 作用在交轴上的电枢反应称为交轴电枢反应
 - $\psi=0^\circ$, $\cos \psi=1$, $\sin \psi=0$, 不发出无功功率
 - 输出电流和空载电势同相，有功功率从电机输至电网
- 发电机状态

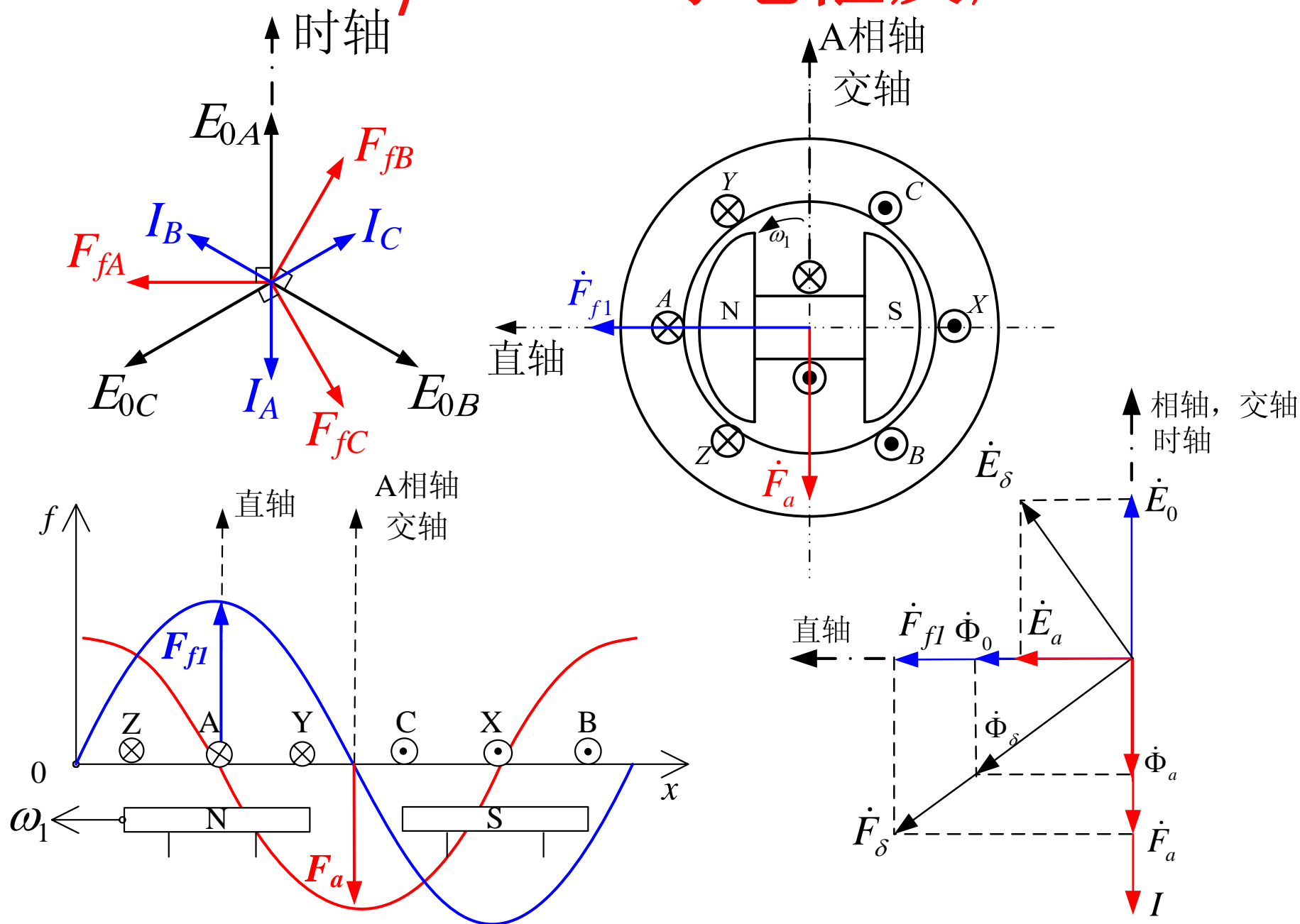
II. $\psi=90^\circ$ 时电枢反应



II. $\psi=90^\circ$ 时电枢反应

- 转子励磁磁势和电枢反应磁势均作用在直轴上，方向相反，电枢反应为纯去磁作用，合成磁势的幅值减小——直轴去磁电枢反应
- 输出电流滞后于空载电势 90° ， $\psi=90^\circ$ ， $\cos\psi=0$ ， $\sin\psi=1$ ，有功功率等于零，仅发出电感性无功功率
- 为保持电压不变，应增大励磁，即为过励状态
 - 向电网输出电感性无功功率

III. $\psi=180^\circ$ 时电枢反应

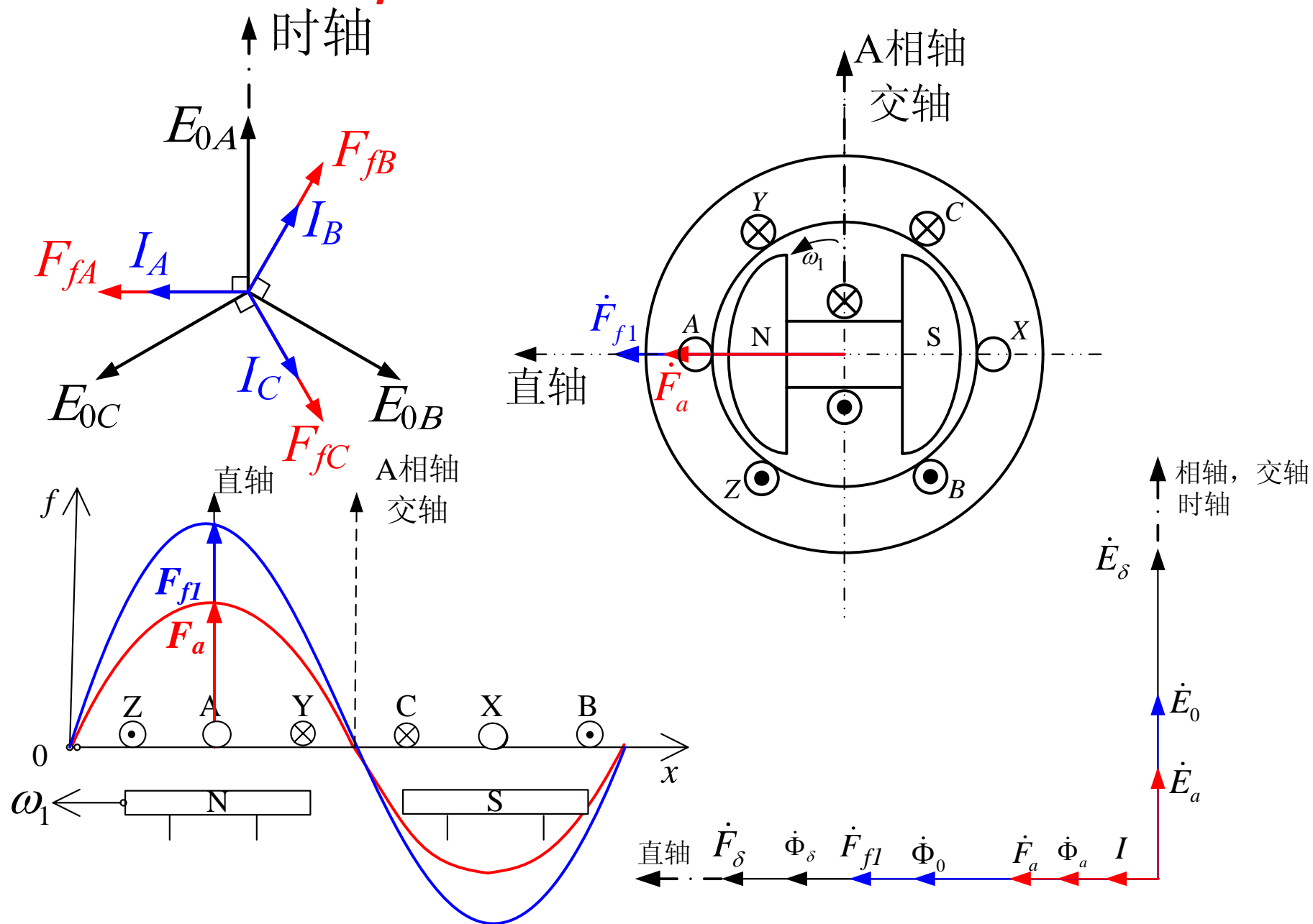


III. $\psi=180^\circ$ 时电枢反应

- 转子励磁磁势在直轴上，电枢反应磁势作用在交轴上，电枢反应的结果使得合成磁势的轴线位置产生一定的偏移，幅值发生一定的变化
- $\psi=180^\circ$, $\cos \psi=-1$, $\sin \psi=0$, 无功功率等于零
- 输出电流与空载电势反相，有功功率从电网输至电机

→ 电动机状态

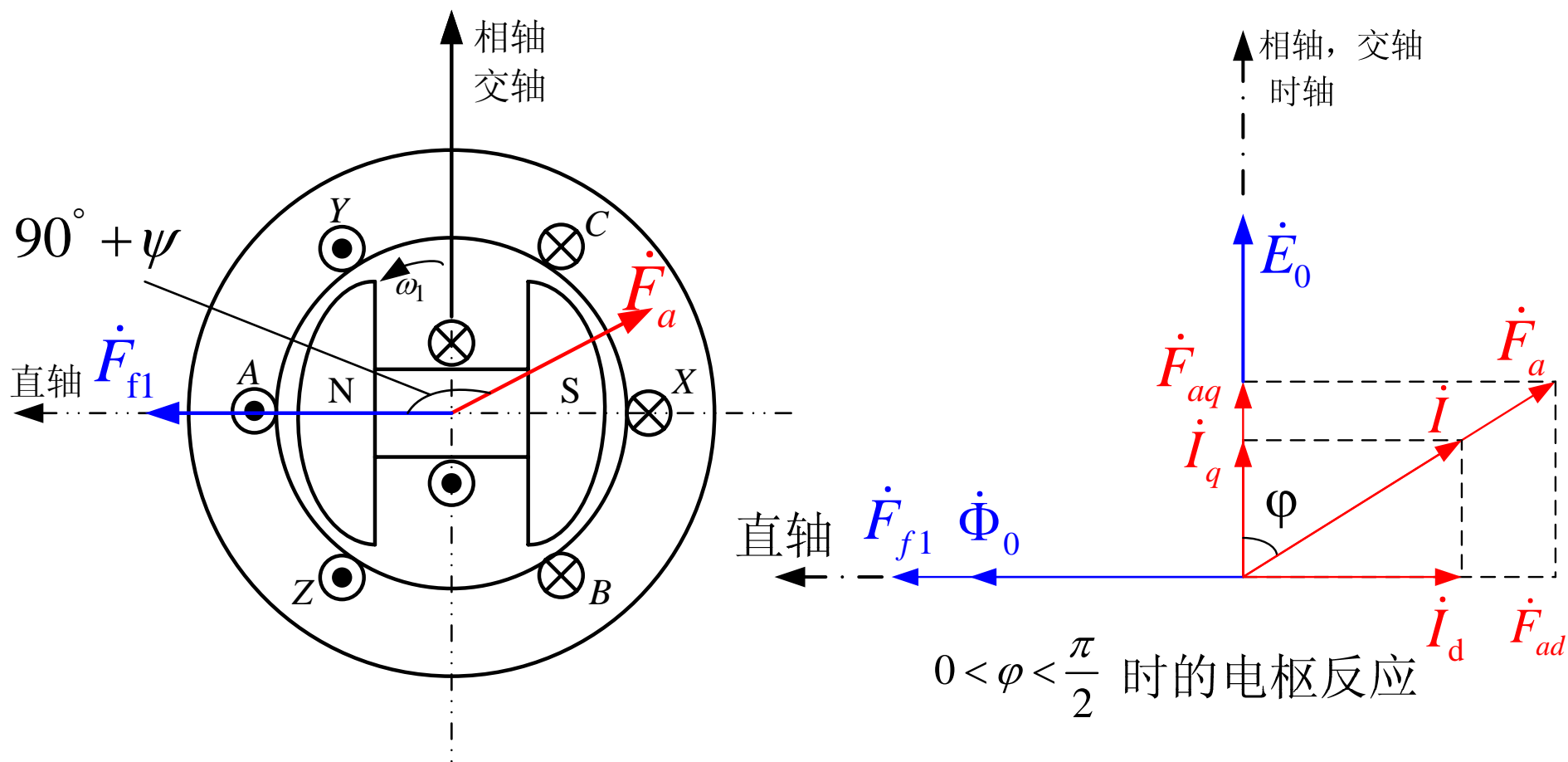
IV. $\psi=-90^\circ$ 时电枢反应



IV. $\psi=-90^\circ$ 时电枢反应

- 转子励磁磁势和电枢反应磁势均作用在直轴上，方向一致，电枢反应为纯增磁作用，合成磁势的幅值增加——直轴增磁电枢反应
- 输出电流超前于空载电势 90° ， $\psi=-90^\circ$ ， $\cos \psi=0$ ， $\sin \psi=-1$ ，有功功率等于零，仅发出电容性无功功率
- 为保持电压不变，应减小励磁，即为欠励状态
 - ➔ 向电网输出电容性无功功率

V. 一般情况时电枢反应



V. 一般情况时电枢反应

➤ 将电枢磁势分解为直轴和交轴两个分量

→

$$\begin{aligned} F_{ad} &= F_a \sin \psi & I_{ad} &= I_a \sin \psi \\ F_{aq} &= F_a \cos \psi & I_{aq} &= I_a \cos \psi \end{aligned}$$

➤ 交轴分量 F_{aq} 滞后于 F_{f1} 为发电机运行， F_{aq} 超前于 F_{f1} 为电动机运行，分别对应于输出和输入有功功率

➤ 直轴分量 F_{ad} 可能是增磁或去磁作用：当去磁作用时，处于过励状态；当增磁作用时，处于欠励状态

V. 一般情况时电枢反应

➤ 内功率因素角 ψ 决定了同步电机的运行方式：

→ { 转子磁场超前定子磁场：发电机运行
转子磁场超前定子磁场的角度超过180电角度，
反形成了定子磁场超前转子磁场：电动机运行

→ { 发电机运行： $0 < \frac{\pi}{2} + \psi < \pi \quad \rightarrow \quad -\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{\pi}{2}$
电动机运行： $\pi < \frac{\pi}{2} + \psi < 2\pi \quad \rightarrow \quad \frac{\pi}{2} < \psi < \frac{3\pi}{2}$

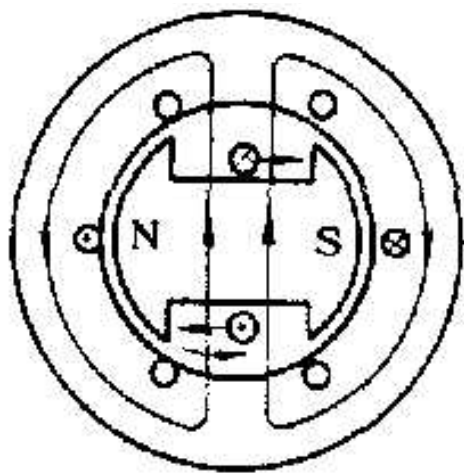
电枢反应是实现能量转换的关键

- 同步电机空载运行时，定子绕组开路，没有负载电流：不存在电枢反应，不存在由转子到定子的能量传递
- 当同步发电机带有负载时，就产生了电枢反应
- 不同负载性质时，电枢磁场与转子电流产生不同性质的电磁力和电磁转矩，实现能量的传递

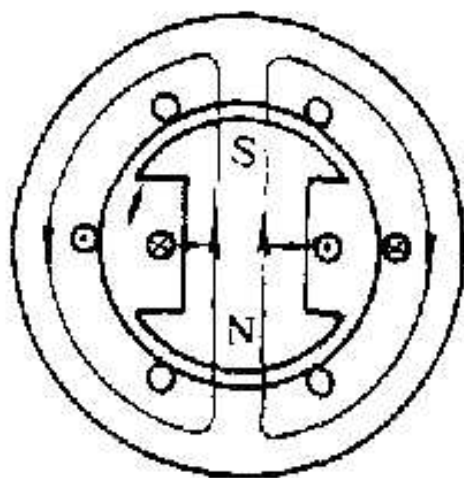
电枢反应是实现能量转换的关键

(a): 电枢反应交轴作用, 电磁力与旋转方向相反, 为了维持发电机的转速不变, 必须随着有功负载的变化调节原动机的输入功率

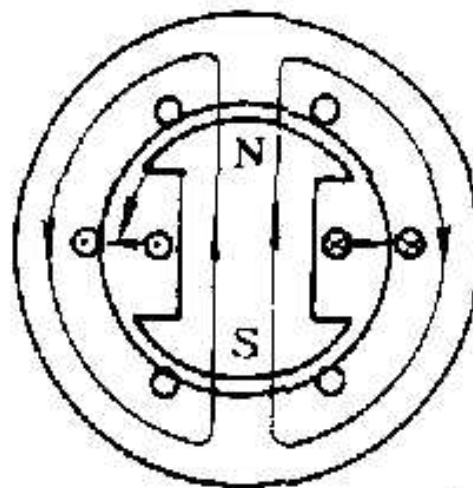
(b)、(c): 电枢反应直轴作用, b为去磁, c为增磁, 为保持发电机的端电压不变, 必须随着无功负载的变化相应地调节转子的励磁电流



(a) $\psi=0^\circ$



(b) $\psi=90^\circ$



(c) $\psi=-90^\circ$

5.隐极同步发电机的分析方法

➤ 不计磁路饱和

➤ 考虑磁路饱和

I. 不计磁路饱和

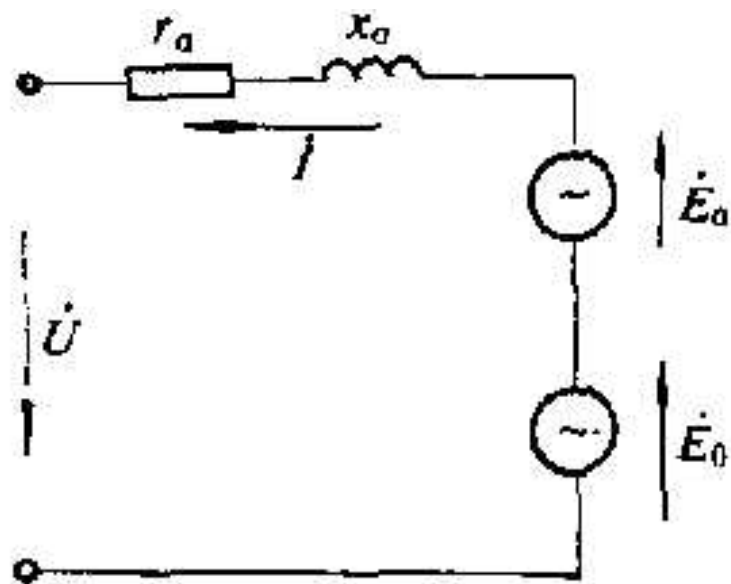
- 电枢磁场和转子磁场都以同步转速与转子绕组没有相对运动，因此在转子绕组中都不会感应出电势
- 当不考虑磁路饱和时，可以应用叠加原理：
假设转子磁场与电枢磁场分别在定子绕组中感应电势
 - 转子磁场感应的电势为空载电势
 - 电枢磁场感应的电势为电枢反应电势

(1) 电路方程和等效电路

➤ 定子回路（每相）电压平衡式

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$

- E_0 —空载电势，反映转子的作用
- E_a —电枢反应电势，反映电枢磁场的作用，是三相合成电枢反应磁场在一相绕组中的感应电势



(2) 电枢反应电抗和同步电抗

电枢磁势基波振幅 $F_a = \frac{m}{2} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \sqrt{2} s q k_{N1} I = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{N1} I$

电枢磁通密度基波振幅 $B_a = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_a = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{N1} I$

每极电枢磁通 $\Phi_a = \frac{2}{\pi} B_a l \tau$

电枢反应电势 $\underline{E_a} = \sqrt{2} \pi f k_{N1} N \Phi_a = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 \tau l}{p k_\delta \delta} \right) \underline{I}$

→ 电枢反应电抗 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

→ $x_a = \frac{E_a}{I} = \frac{16 m f N^2 k_{N1}^2 \tau l}{p k_\delta \delta} \times 10^{-7} \Omega$

(2) 电枢反应电抗和同步电抗

- \dot{E}_a 滞后于 Φ_a 90° ，即较 I 之后 90°

$$\dot{E}_a = -jx_a \dot{I}$$

• 物理意义:

电枢反应磁场在定子每相绕组中感应的电枢反应电势，可以看作相电流所产生的一个电抗电压降

$$I \rightarrow F_a \rightarrow \Phi_a \rightarrow E_a$$

(2) 电枢反应电抗和同步电抗

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma) \quad \dot{E}_a = -jx_a \dot{I}$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} \left[r_a + j(x_a + x_\sigma) \right]$$

定子绕组漏磁通

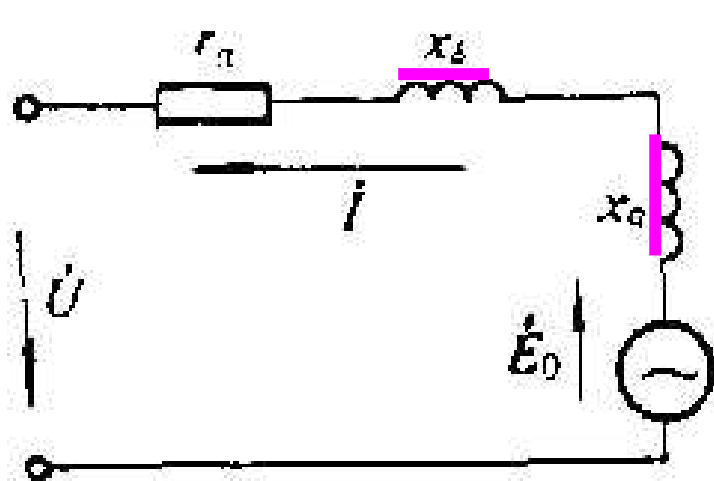
$$= \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_s) = \dot{U} + \dot{I}Z_s$$

定子电流所产生的空气隙旋转磁场

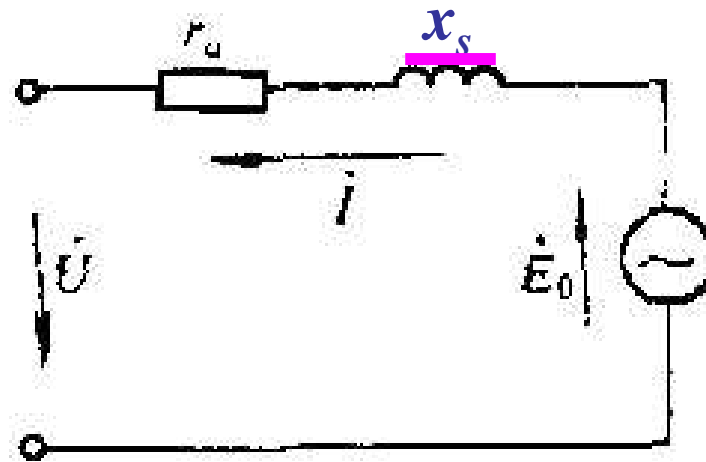
同步电抗 $x_s = x_a + x_\sigma$

同步阻抗 $Z_s = r_a + x_s$

(2) 电枢反应电抗和同步电抗



(a)



(b)

➤ 当三相对称电枢电流流过电枢绕组时，将产生旋转的电枢磁势，在电机内部产生跨过气隙的电枢反应磁通和不通过气隙的漏磁通，分别在电枢各相绕组中感应出电枢反应电势 \dot{E}_a 和漏磁电势 \dot{E}_σ

➤ 定子旋转磁势是三相电流联合产生的，幅值为每相脉动磁势幅值的 $3/2$ 倍。磁通在绕组中的感应电势用相电流在电抗上的压降表示，为每相值

(3) 隐极发电机的相量图

在作相量图时，假设已知：发电机的端电压 U ，电枢电流 I ，负载功率因数角 θ ，每相电阻 r_a 、同步电抗 x_s 。根据方程式求空载电势 E_0

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} [r_a + j(x_a + x_\sigma)]$$

步骤1：在水平方向作出相量 U

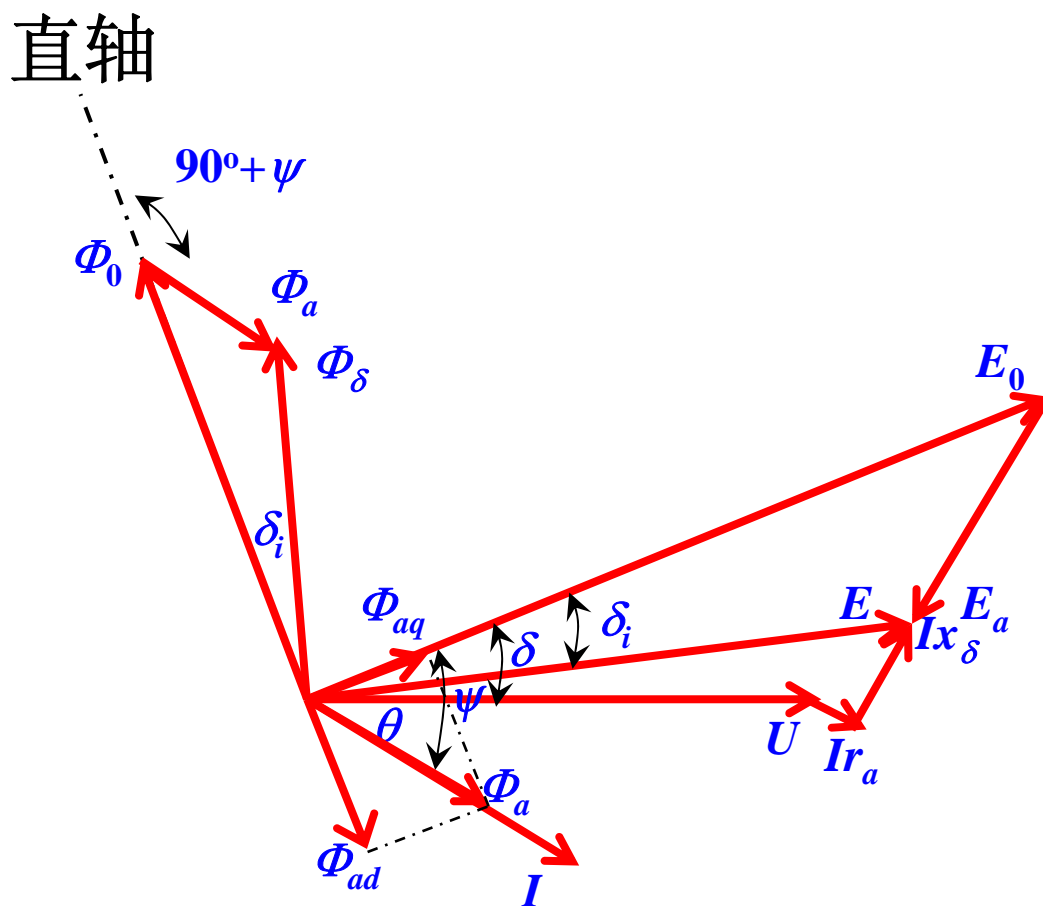
步骤2：根据 θ 作 I 的方向并作出相量

步骤3：在 U 的尾端加上 $I r_a$ 和相量 $j I x_\sigma$ ，它超前于 I 90°，得到相量 E

步骤4：再加上相量 $j I x_a$ ，得到相量 E_0

(3) 隐极发电机的相量图

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} \left[r_a + j(x_a + x_\sigma) \right] = \dot{E} - \dot{E}_a$$



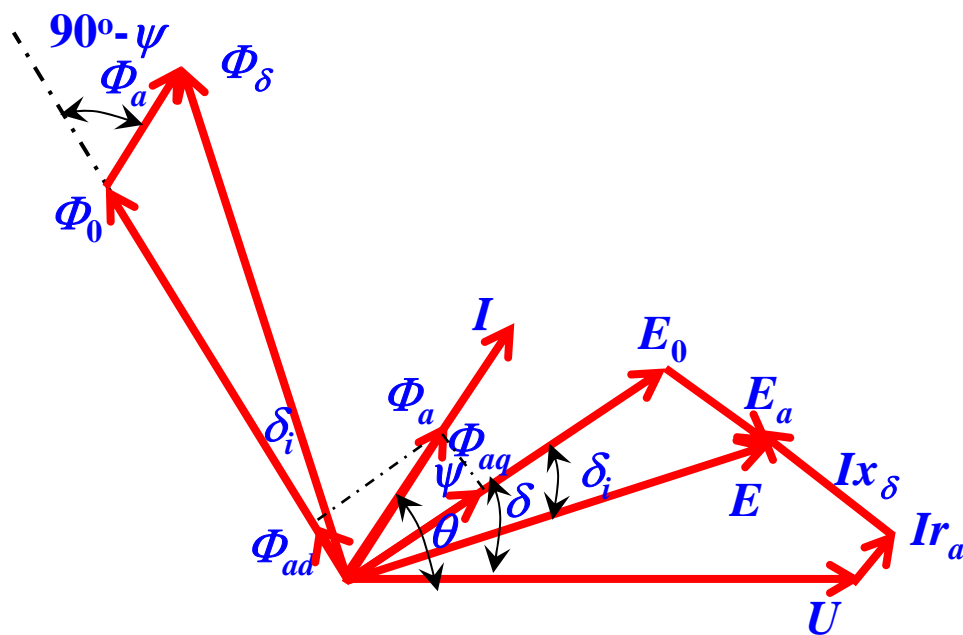
$$0 < \psi < \frac{\pi}{2}$$

发电机处于
过励状态

(3) 隐极发电机的相量图

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} \left[r_a + j(x_a + x_\sigma) \right] = \dot{E} - \dot{E}_a$$

直轴

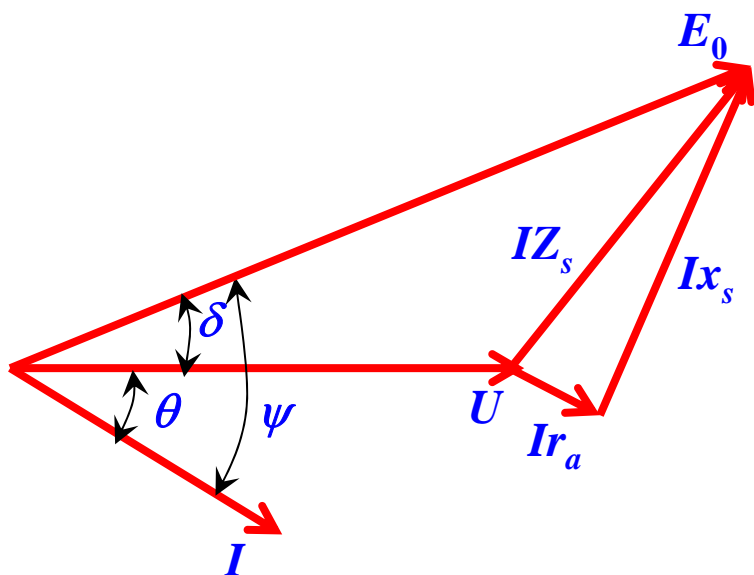


$$0 > \psi > -\frac{\pi}{2}$$

发电机处于
欠励状态

(3) 隐极发电机的相量图

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I} \left[r_a + j(x_a + x_\sigma) \right] \\ &= \dot{U} + \dot{I} (r_a + jx_s) = \dot{U} + \dot{I} Z_s\end{aligned}$$

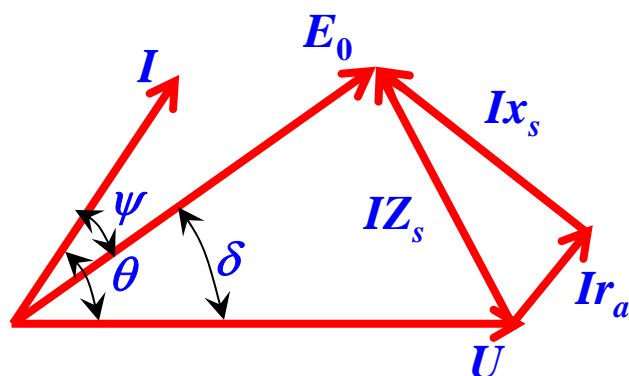


$$0 < \psi < \frac{\pi}{2}$$

发电机处于
过励状态

(3) 隐极发电机的相量图

$$\begin{aligned}\dot{E}_0 &= \dot{U} + \dot{I} \left[r_a + j(x_a + x_\sigma) \right] \\ &= \dot{U} + \dot{I} (r_a + jx_s) = \dot{U} + \dot{I} Z_s\end{aligned}$$



$$0 > \psi > -\frac{\pi}{2}$$

发电机处于
欠励状态

II. 考虑磁路饱和

- 磁路不饱和时，分别由磁势 → 磁密 → 感应电势，然后进行叠加
- 考虑磁路饱和，则叠加原理不适用
- 先得到气隙合成磁势 F_δ ，利用磁化曲线，确定产生合成的磁场及其合成感应电势
- 电枢磁势折算为等效的转子磁势，并与原转子磁势合成为等效的气隙合成磁势
- 隐极机与凸极机气隙形状不一样，有不同的折算结果

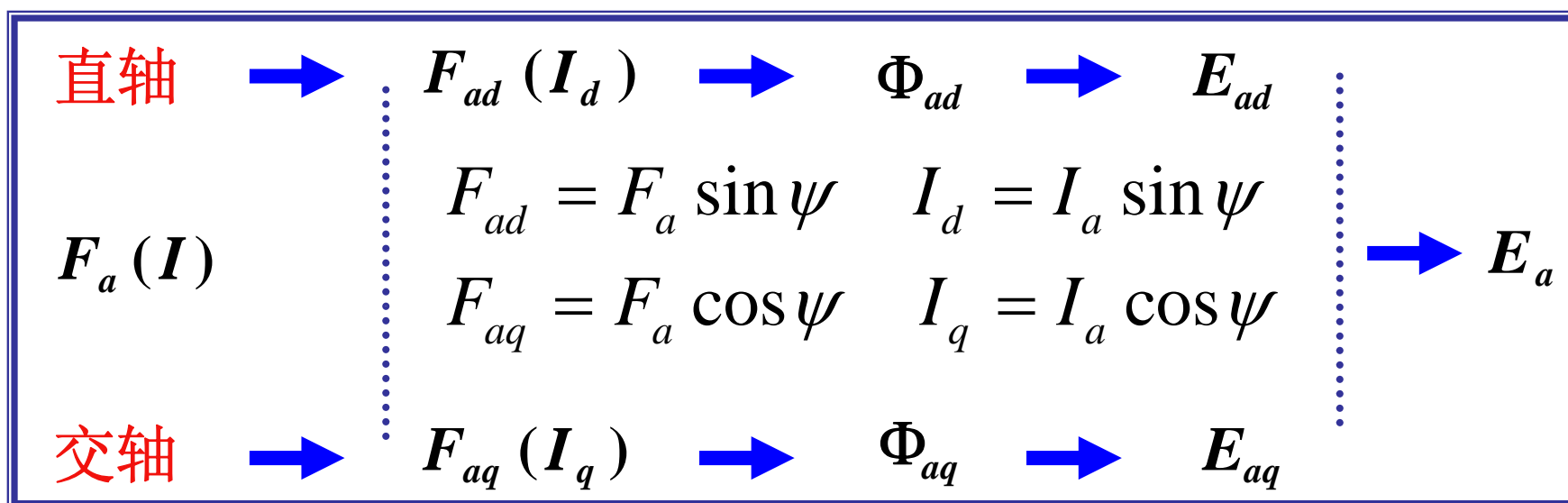
6.凸极同步发电机的分析方法

- 双反应理论
- 电路方程和等效电路
- 直轴与交轴电枢反应电抗和同步电抗
- 凸极发电机的相量图

I. 凸极同步电机的双反应理论

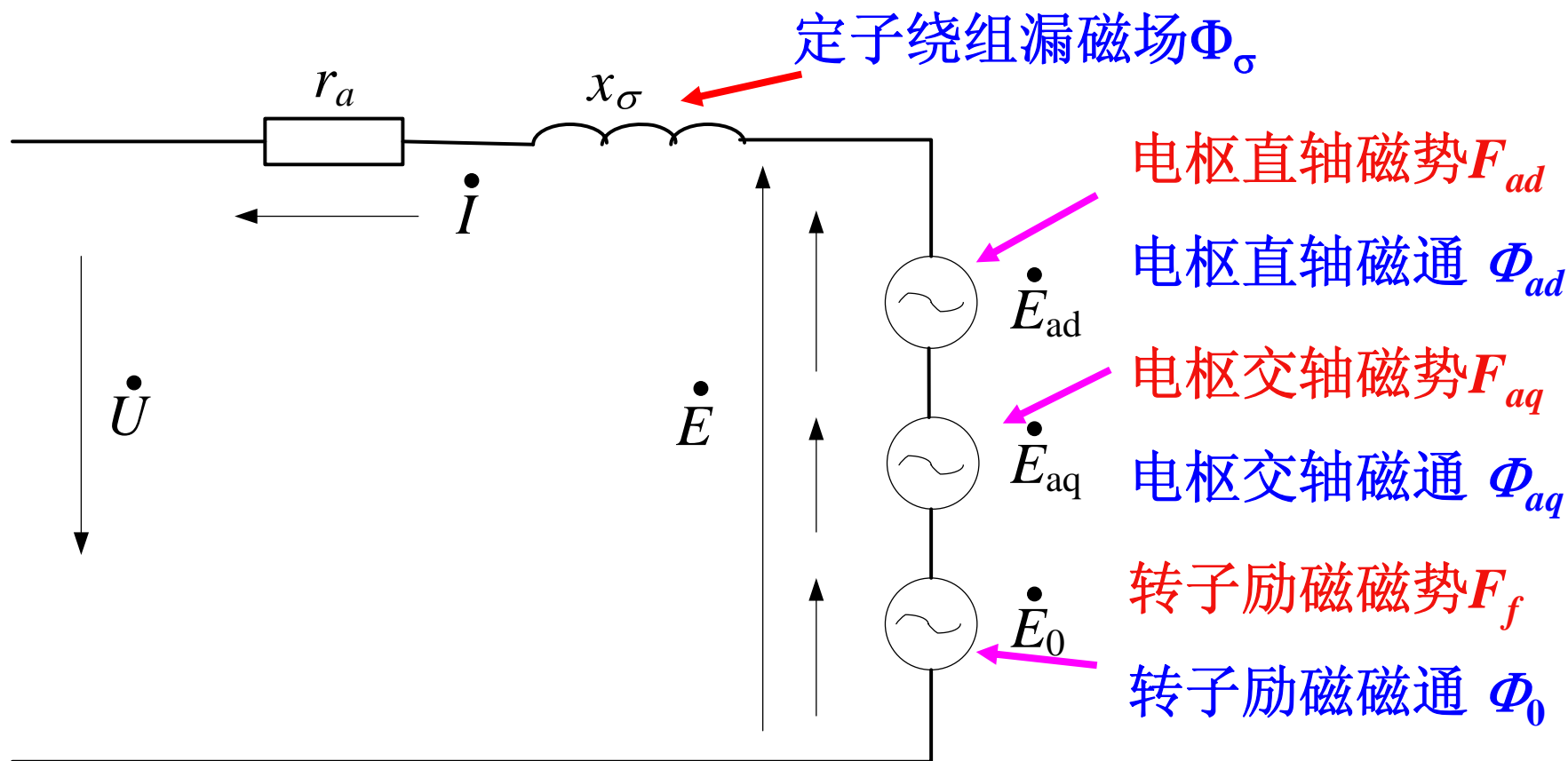
- 凸极同步电机的气隙不均匀：在极面下的磁导大，两极之间的磁导小
- 同一电枢磁势波作用在气隙不同处，会遇到不同的磁阻，产生不同的磁密： $\Phi = F\Lambda$, $B = \Phi/S$
- 双反应法—电枢基波磁势 F_a 分解为直轴上的直轴电枢反应磁势 F_{ad} 和交轴上的交轴电枢反应磁势 F_{aq}
- 根据直轴和交轴的磁导（固定常数），分别求出直轴和交轴的磁通密度波及磁通
- 求出在每相定子绕组中直轴电枢反应电势 E_{ad} 和交轴电枢反应电势 E_{aq}
- 双反应法的基础：当不计饱和时，适用叠加原理，用双反应法来分析凸极同步电机

I. 凸极同步电机的双反应理论



II. 电路方程与等效电路

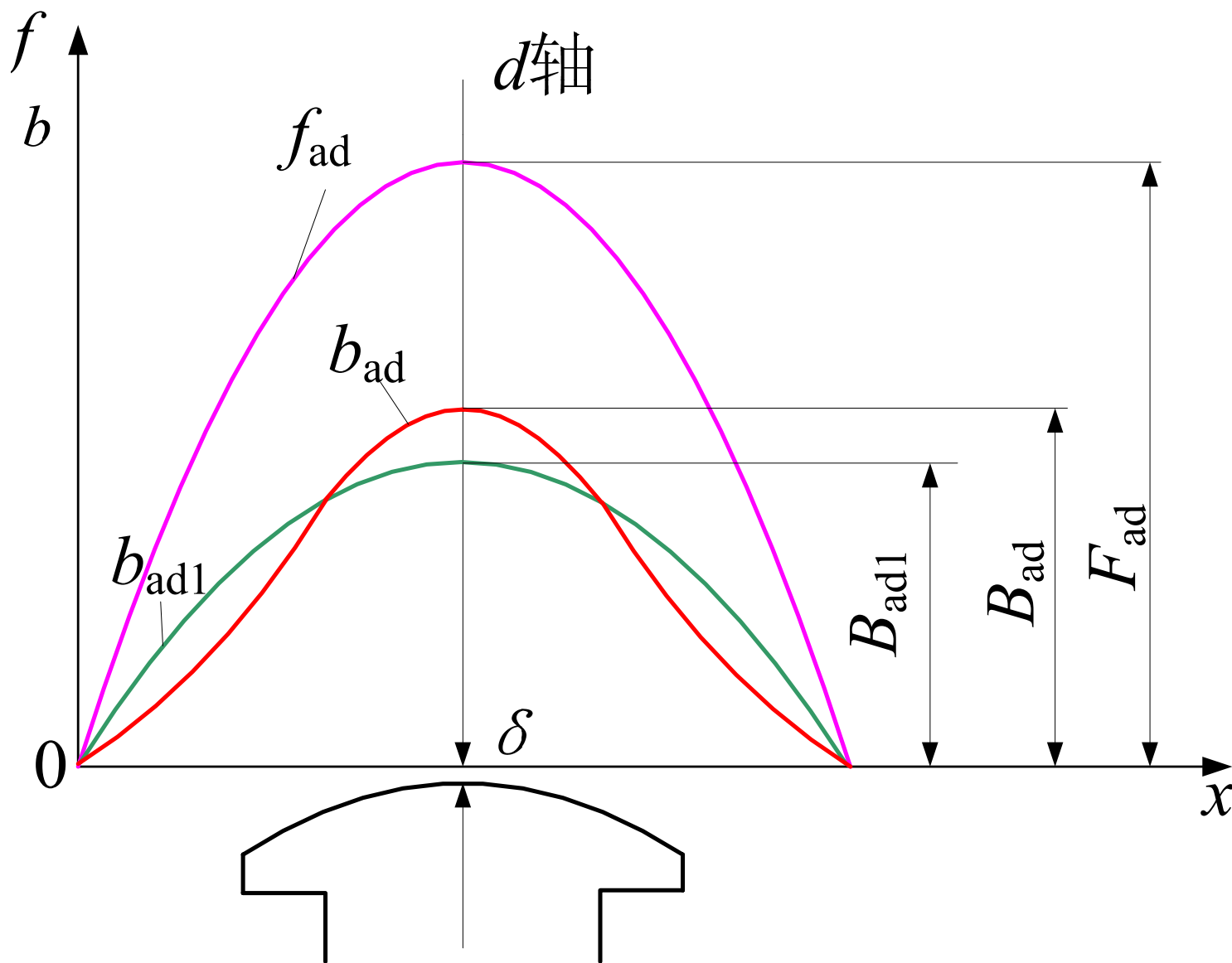
$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$



III. x_{ad} / x_{aq} 和 x_d / x_q

- 直轴电枢反应电抗 x_{ad}
- 交轴电枢反应电抗 x_{aq}
- 直轴同步电抗 x_d
- 交轴同步电抗 x_q

(1) 直轴电枢反应电抗 x_{ad}



(1) 直轴电枢反应电抗 x_{ad}

- 直轴电枢反应磁势 f_{ad} , 基波振幅: $F_{ad} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{N1} I_d$
- 磁通密度分布波的振幅: $B_{ad} = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_{ad}$
- 磁通密度波基波分量振幅: $B_{ad1} = k_d B_{ad}$
- 直轴电枢反应基波每极磁通:

$$\Phi_{ad1} = \frac{2}{\pi} B_{ad1} l \tau = \frac{2 \sqrt{2}}{\pi^2} \frac{\mu_0 m N k_{N1} \tau l k_d}{p k_\delta \delta} I_d$$

- 感应产生的直轴电枢反应电势:

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi f N k_{N1} \Phi_{ad1} = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_d}{p k_\delta \delta} \right) I_d$$

(1) 直轴电枢反应电抗 x_{ad}

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d x_{ad} \longrightarrow x_{ad} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_d}{p k_\delta \delta}$$

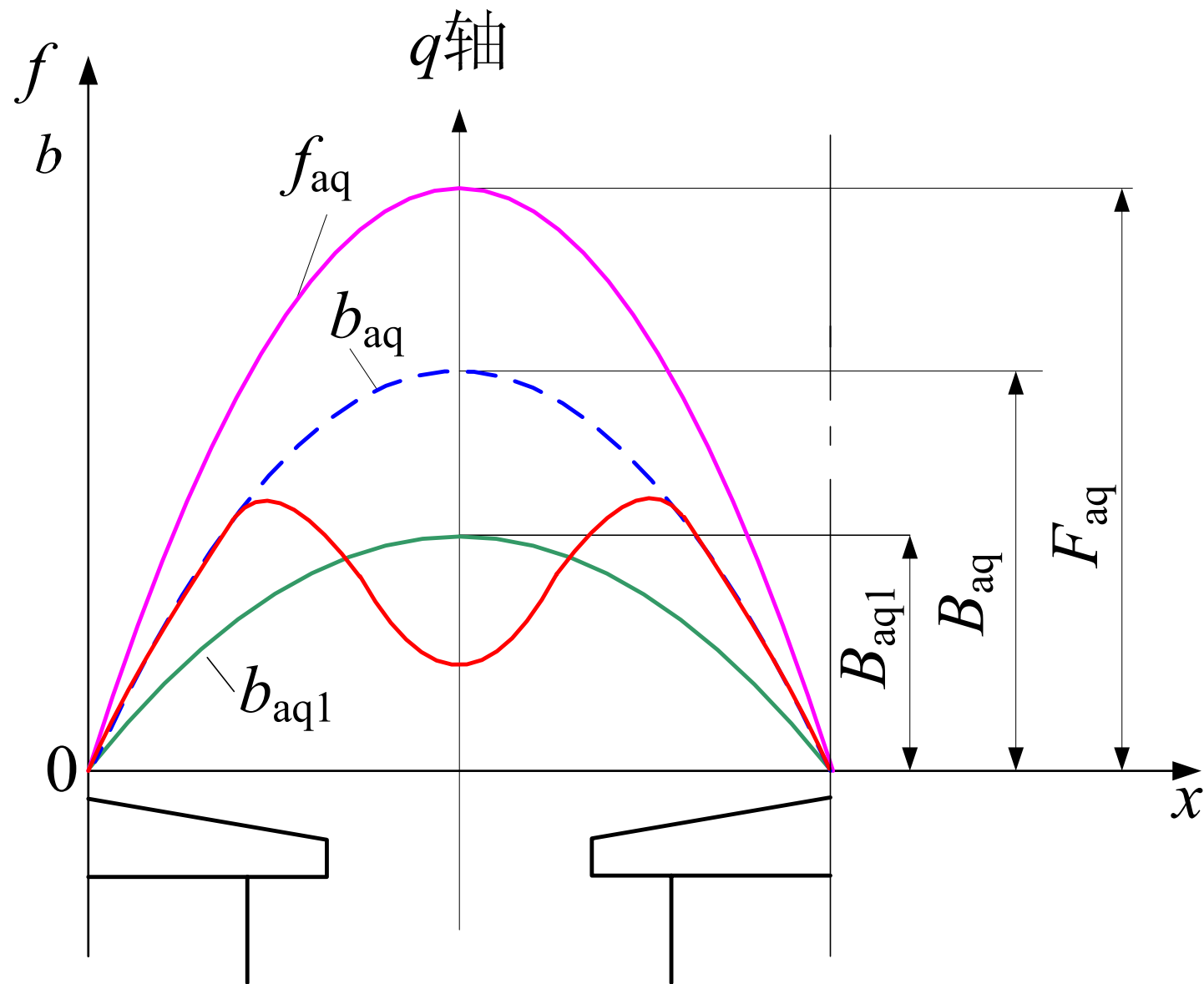
$$E_a = \sqrt{2} \pi f k_{N1} N \Phi_a = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 \tau l}{p k_\delta \delta} \right) I$$

$$E_{ad} = \sqrt{2} \pi f N k_{N1} \Phi_{ad1} = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_d}{p k_\delta \delta} \right) I_d$$

$$\longrightarrow x_{ad} = k_d x_a$$

k_d 的数值，一般在**0.8~1**之间，它和磁极下的**最大、最小**气隙之比及**极弧系数**（**极弧**与**极距**之比）等有关

(2) 交轴电枢反应电抗 x_{aq}



(2) 交轴电枢反应电抗 x_{aq}

- 交轴电枢反应磁势 f_{aq} , 基波振幅: $F_{aq} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \frac{N}{p} k_{N1} I_q$
- 磁通密度分布波的振幅: $B_{aq} = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} F_{aq}$
- 磁通密度波基波分量振幅: $B_{aq1} = k_q B_{aq}$
- 交轴电枢反应基波每极磁通:

$$\Phi_{aq1} = \frac{2}{\pi} B_{aq1} l \tau = \frac{2 \sqrt{2}}{\pi^2} \frac{\mu_0 m N k_{N1} \tau l k_q}{p k_\delta \delta} I_q$$

- 感应产生的交轴电枢反应电势:

$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi f N k_{N1} \Phi_{aq1} = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_q}{p k_\delta \delta} \right) I_q$$

(2) 交轴电枢反应电抗 x_{aq}

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q x_{aq} \quad \longrightarrow \quad x_{aq} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_q}{p k_\delta \delta}$$

$$E_a = \sqrt{2} \pi f k_{N1} N \Phi_a = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 \tau l}{p k_\delta \delta} \right) I$$

$$E_{aq} = \sqrt{2} \pi f N k_{N1} \Phi_{aq1} = \left(\frac{4}{\pi} \frac{\mu_0 m f N^2 k_{N1}^2 l \tau k_q}{p k_\delta \delta} \right) I_q$$

$$\longrightarrow \quad x_{aq} = k_q x_q$$

k_q 的数值，一般在 **0.4~0.6** 之间。

(3) 直轴和交轴同步电抗 x_{ad}/x_{aq}

设 x_{σ} 为定子每相绕组漏抗，则合并漏抗与电枢反应电抗，可得：

直轴同步电抗 $x_d = x_{ad} + x_{\sigma}$

交轴同步电抗 $x_q = x_{aq} + x_{\sigma}$

同步电抗的表示方法：标么值

电压基值—额定相电压，电流基值—额定相电流，阻抗基值—电压基值/电流基值

隐极式同步发电机 x_s ：0.9~2.5；

凸极式同步发电机 x_d ：0.65~1.6； x_q ：0.4~1.0

IV. 凸极发电机的相量图

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$

$$\rightarrow \dot{E}_0 - j\dot{I}_d x_{ad} - j\dot{I}_q x_{aq} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$

$$\rightarrow \dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d (x_\sigma + x_{ad}) + j\dot{I}_q (x_\sigma + x_{aq})$$

$$\rightarrow \dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q$$

在已知 \dot{U} 、 \dot{I} 、 θ 、 r_a 、 x_d 和 x_q 的情况下，如何画出凸极发电机的相量图，关键在于得到内功率因素角 ψ

$$\rightarrow \dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + \underline{j\dot{I}_d x_d} + \underline{j\dot{I}_q x_q} + \underline{j\dot{I}_d x_q} - \underline{j\dot{I}_q x_d}$$

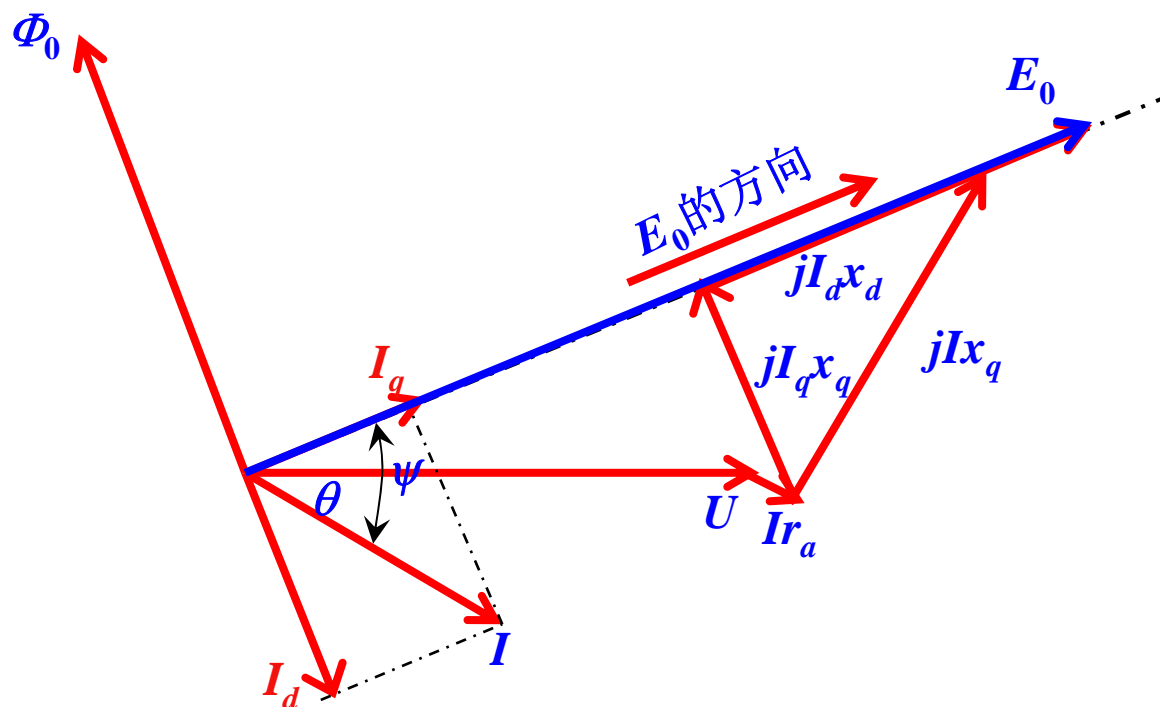
$$\rightarrow \underline{\dot{E}_0 - j\dot{I}_d (x_d - x_q)} = \dot{U} + \underline{\dot{I}r_a + j\dot{I}_q x_q}$$

IV. 凸极发电机的相量图

$$\dot{E}_0 - j\dot{I}_d(x_d - x_q) = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_q$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + \underline{j\dot{I}_d x_d} + \underline{j\dot{I}_q x_q}$$

直轴

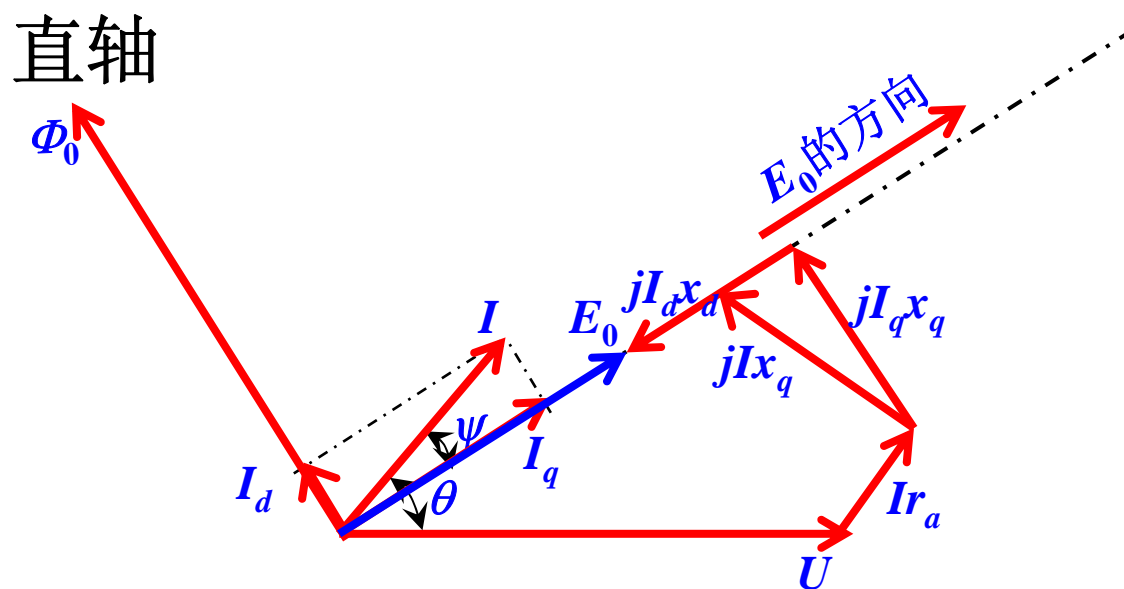


$$0 < \psi < \frac{\pi}{2}$$

发电机处于
过励状态

IV. 凸极发电机的相量图

$$\dot{E}_0 - j\dot{I}_d(x_d - x_q) = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_q$$
$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + \underline{j\dot{I}_d x_d} + \underline{j\dot{I}_q x_q}$$

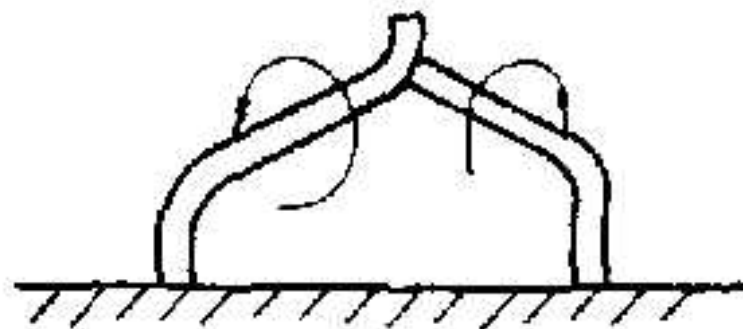
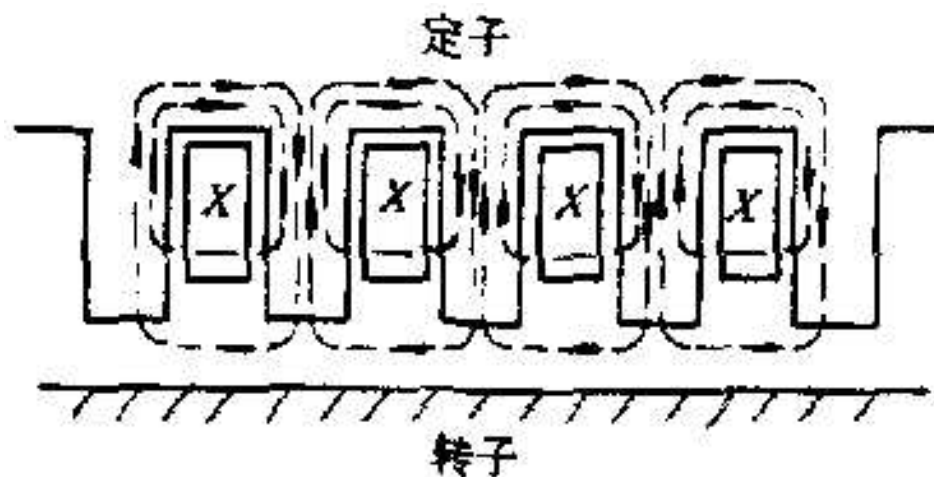


$$0 > \psi > -\frac{\pi}{2}$$

发电机处于
欠励状态

7. 电枢绕组的漏抗

- **互磁通**：电枢绕组电流所产生的电枢磁通穿过气隙，进入转子并和转子绕组交链
- **电枢漏磁通**：电枢绕组电流所产生的电枢磁通只与电枢绕组本身交链，不穿过气隙
 - 槽漏磁通
 - 端接部分漏磁通



7.电枢绕组的漏抗

- 漏磁电动势 E_{σ} ：电枢漏磁通以电枢电流的频率脉动，在电枢绕组中产生感应电动势
- 电枢漏抗 x_{σ} ：电枢绕组中每相漏磁电动势与每相电枢电流的比值。漏磁路主要为气隙，不饱和，漏抗为常数，数值很小，标么值0.07~0.45之间
- 差漏抗（谐波漏抗）：电枢高次空间谐波磁通（旋转速度为同步速），在电枢绕组中感应电势为基波频率，其数值更小，一般只有 x_{σ} 的10%~20%
- 电枢漏抗的影响：
 - 槽漏磁通产生电流的集肤效应，增加铜耗
 - 端部漏磁通引起涡流，产生局部发热
 - 漏抗电势影响端电压

作业

- 思考题: $p.251$ 12-1~12-6
- 习题: $p.251$ 12-1~12-4
- 要求: 绘出相量图, 说明参考相量, 区分角度 θ 、 δ 、 ψ 。

可以由上四题体会汽轮发电机与水轮发电机的参数差异。

8.同步发电机空载、短路和负载特性

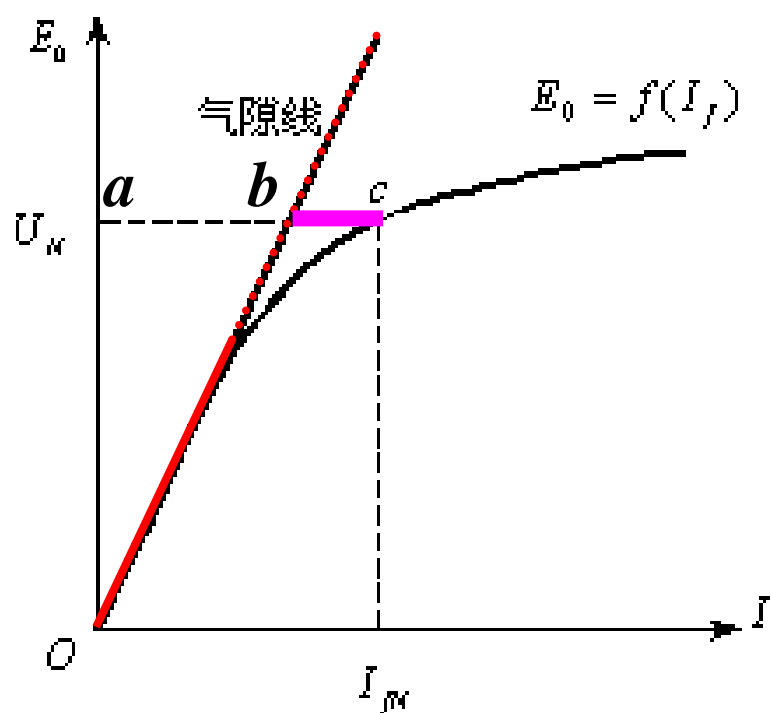
➤ 空载特性

➤ 短路特性

➤ 负载特性

I. 同步发电机的空载特性

- 定义：当空载运行时（电枢绕组开路， $I_a=0$ ），空载电动势 E_0 随转子励磁电流 I_f 变化的关系 $E_0=f(I_f)$
- 空载特性与电机磁路的磁化曲线具有类似的变化规律



同步发电机的空载特性

- 当励磁电流较小时，由于磁通较小，电机磁路没有饱和，空载特性呈直线（将其延长后的射线称为气隙线），磁势主要消耗在气隙上
- 随着励磁电流的增大，磁路逐渐饱和，磁化曲线开始进入饱和段（向下弯曲）
- 铁磁饱和后，需磁势迅速增大，横向距离 bc 为铁磁部分的磁压
- 为了合理地利用材料，空载额定电压一般设计在空载特性的弯曲处，如图中的 c 点

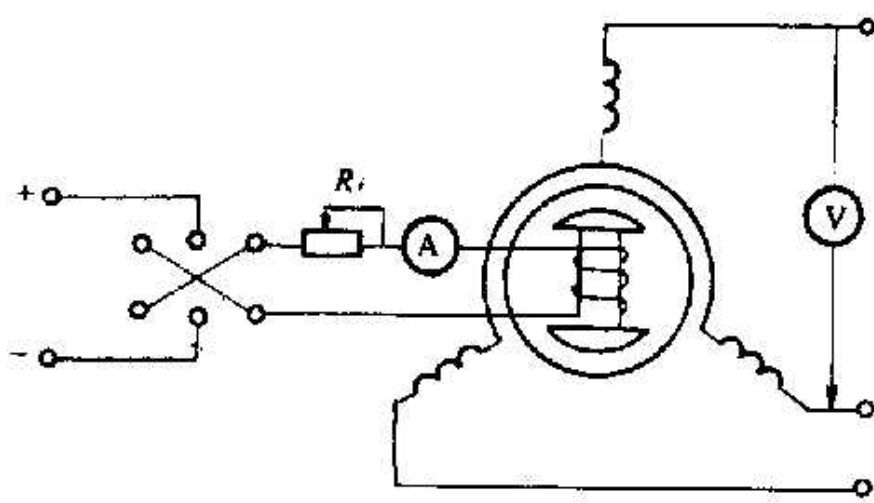
I. 同步发电机的空载特性

➤ 饱和系数 k_μ :

$E_0^*=1$ 时的总磁势与气隙磁势之比，一般在**1.1-1.25**间

意义：空载磁路饱和后，由励磁磁势所建立的磁通和感应电势都降低到未饱和时的 **$1/k_\mu$** 。

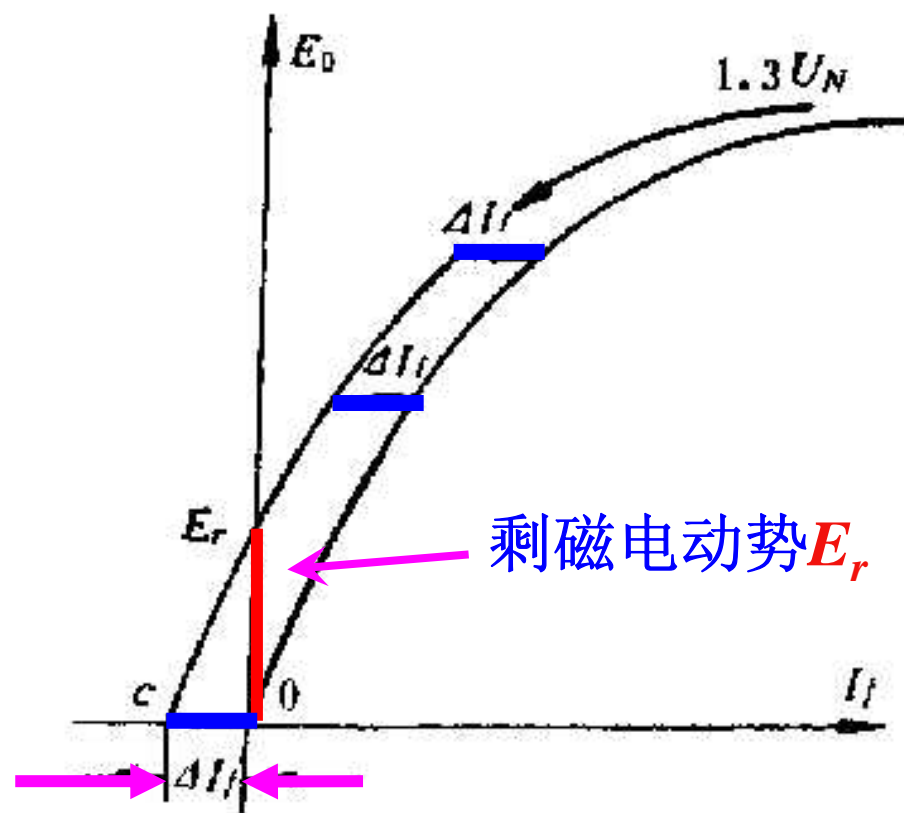
➤ 实验测定：



同步机空载试验接线图

- 调节可变电阻，使励磁电流逐步上升，每次记下 I_f 和 E_0 的读数
- 作同步电机的空载特性
- 由于存在剩磁，规定用下降曲线来表示空载特性
- 从 $1.3U_N$ 对应的励磁电流逐步减小

I. 同步发电机的空载特性



空载特性曲线的校正

标么值计算时的基值

- 定子侧

电压基值：额定相电压

电流基值：额定相电流

容量功率基值：电压基值*电流基值

阻抗基值：电压基值/电流基值

- 转子侧

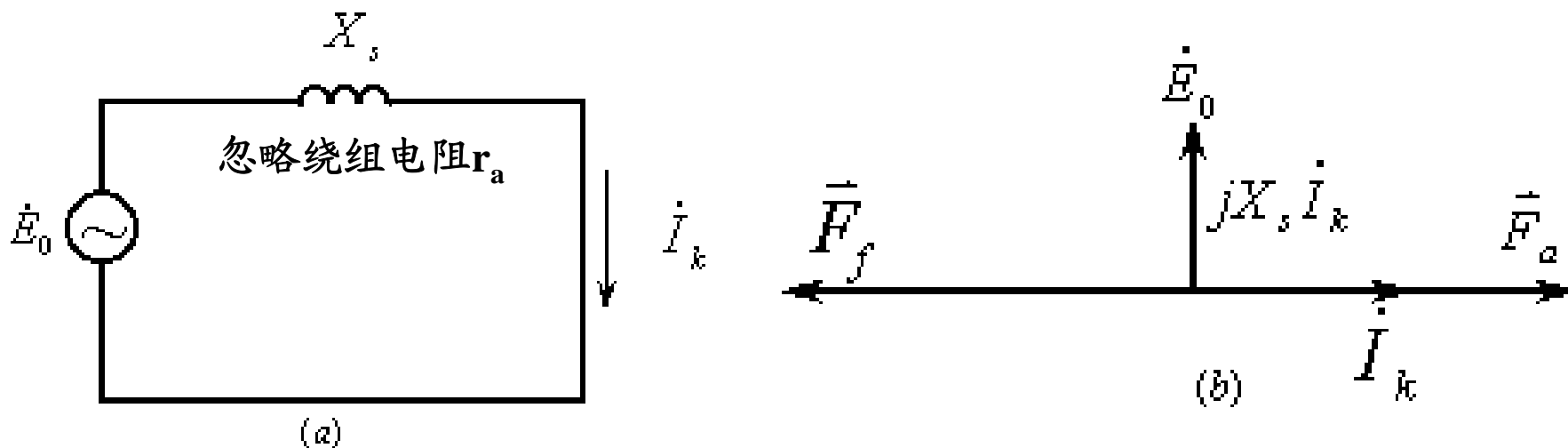
转子电流基值：空载电势为额定相电压时的励磁电流

空载特性的工程应用

- 将设计好的电机的空载特性与常规空载特性相比较，如果两者接近，说明电机设计合理，反之，则说明该电机的**磁路**过于饱和或者材料没有充分利用
- 如**太饱和**，将使励磁绕组用铜过多，且电压调节困难
- 如**饱和度太低**，则负载变化时电压变化较大，且铁心利用率较低，铁心耗材较多
- **结合短路特性可以求取同步电机的参数**
- 发电厂通过测取空载特性来判断三相绕组的对称性以及励磁系统的故障。

II. 同步发电机的短路特性

- 定义：发电机三相**稳态短路**试验时，电枢短路电流 I_k 与励磁电流 I_f 间的关系曲线 $I_k = f(I_f)$



(c) 短路运行时， I_k 滞后于 E_0 90° 电角度， $\psi = 90^\circ$ ，交轴分量 $I_{kq} = 0$ ，电枢反应为**纯去磁**作用。

影响：电机磁路处于不饱和状态

II. 同步发电机的短路特性

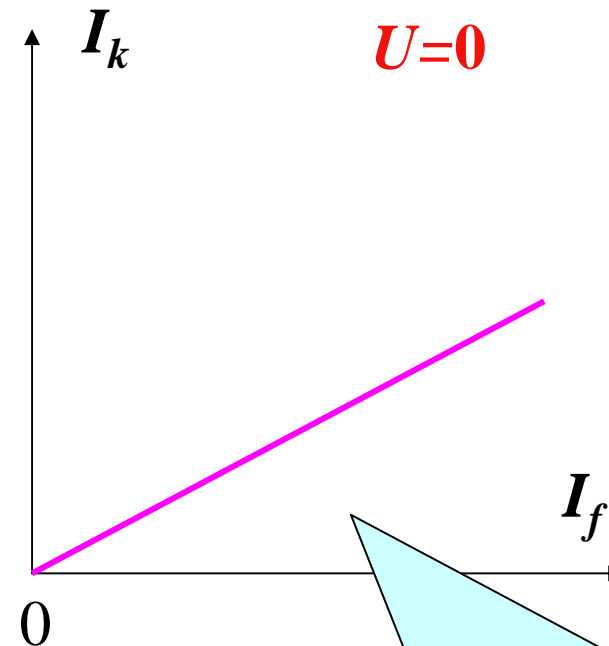
➤ 短路特性曲线

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{E} = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma)$$

$$F_\delta \propto \Phi \propto E \propto I_k$$

$$F_a \propto I_k$$

$$I_f \propto \bar{F}_{f1} = (\bar{F}_\delta - \bar{F}_a) \propto I_k$$

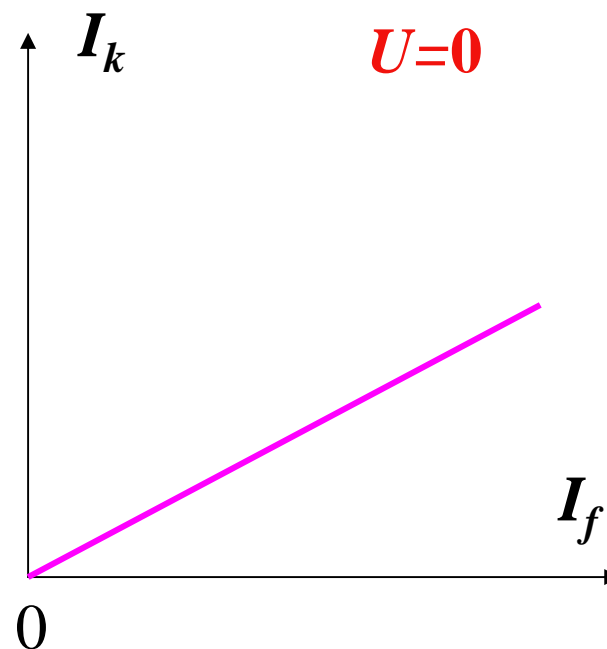


稳态短路时，电枢反应为纯去磁作用，电机的磁通和感应电势较小，短路电流不大，三相稳态短路运行没有危险

II. 同步发电机的短路特性

➤ 短路试验

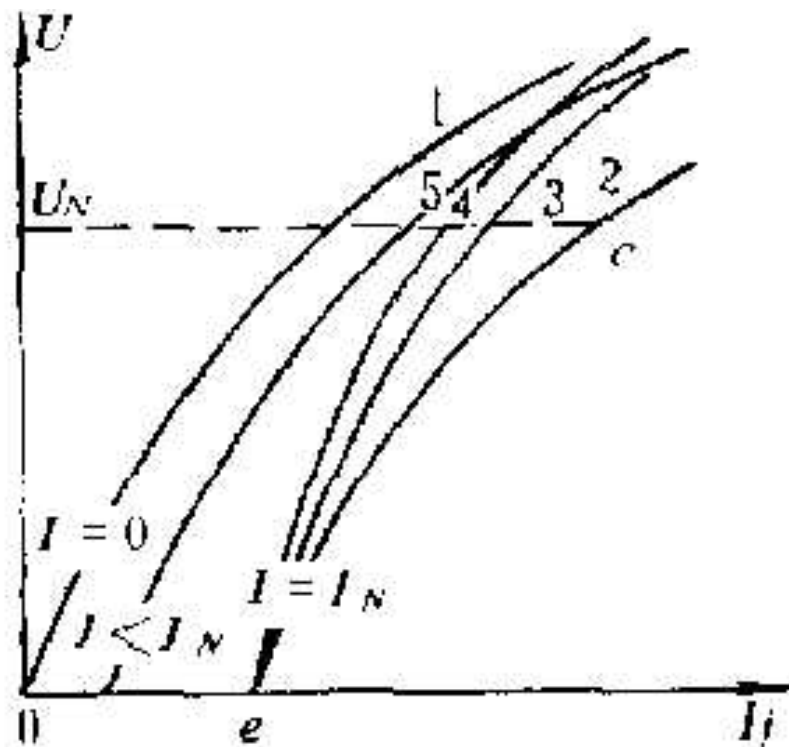
- 将三相电枢绕组在出线端处短接
- 起动原动机将发电机带到同步转速
- 通入不同数值的励磁电流 I_f ，读取每次相应的短路电流 I_k
- 即得同步发电机的短路特性



III. 同步发电机的负载特性

- 负载特性定义：当电枢电流 I 及功率因数 $\cos\theta$ 均为常数时，端电压 U 与励磁电流 I_f 间的关系曲线

$$I=\text{const}, \cos\theta=\text{const}, U=f(I_f)$$

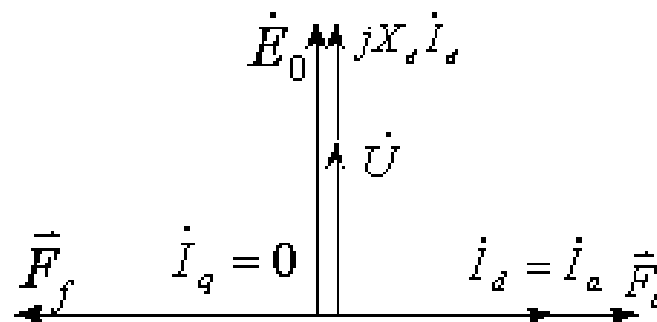


III. 同步发电机的负载特性

- ▶ 零功率因数曲线定义：当电枢电流 $I=I_N$ ，功率因数角 $\theta=90^\circ$ ， $\cos\theta=0$ 时，端电压 U 与励磁电流 I_f 间的关系曲线，或称感性负载特性曲线
- ▶ 零功率因数特性特点：纯感性负载，纯去磁作用的电枢反应 $F_{aq} = 0, F_{ad} = F_a$

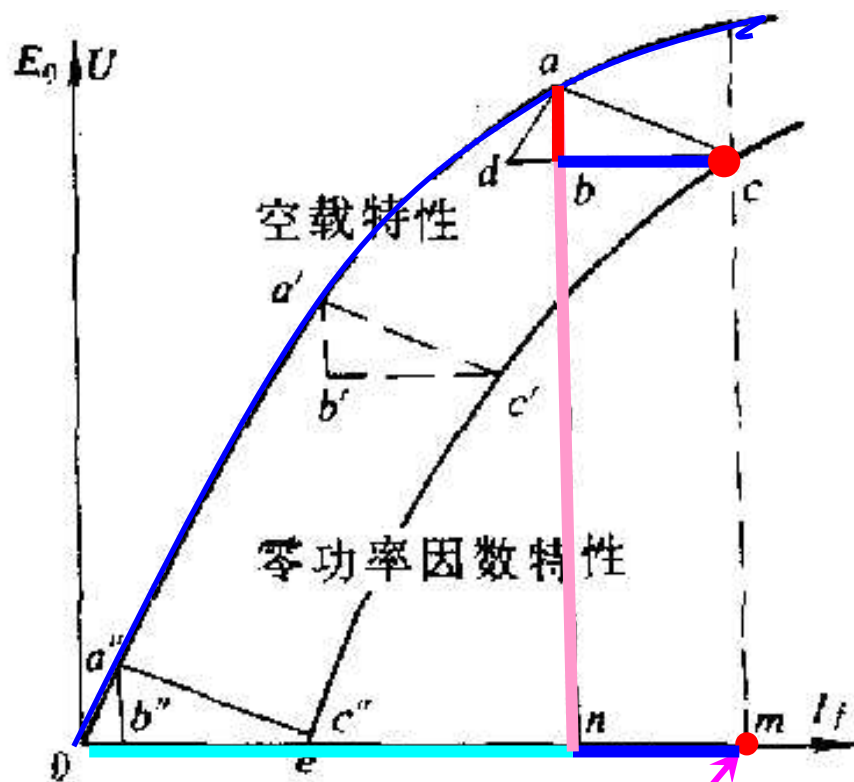
$$F_\delta = F_f - k_{ad} F_{ad}$$

$$U = E_0 - Ix_s = E - Ix_\sigma$$



重点：空载特性 → 零功率因数曲线

$$F_{\delta} = F_f - k_{ad} F_{ad} \quad U = E_0 - Ix_s = E - Ix_{\sigma}$$



负载时实际励磁电流

om: 对应于 F_f 的励磁电流 I_f

mn: 对应于电枢电流为 I_N 时所产生的去磁磁势 $k_{ad}F_{ad}$ 的励磁电流

on: 气隙合成磁势 F_{δ} 的励磁电流

an: 对应于 F_{δ} 的合成电动势 E

ab: 对应于 $I_N x_{\sigma}$ 的漏抗压降 E_{σ}

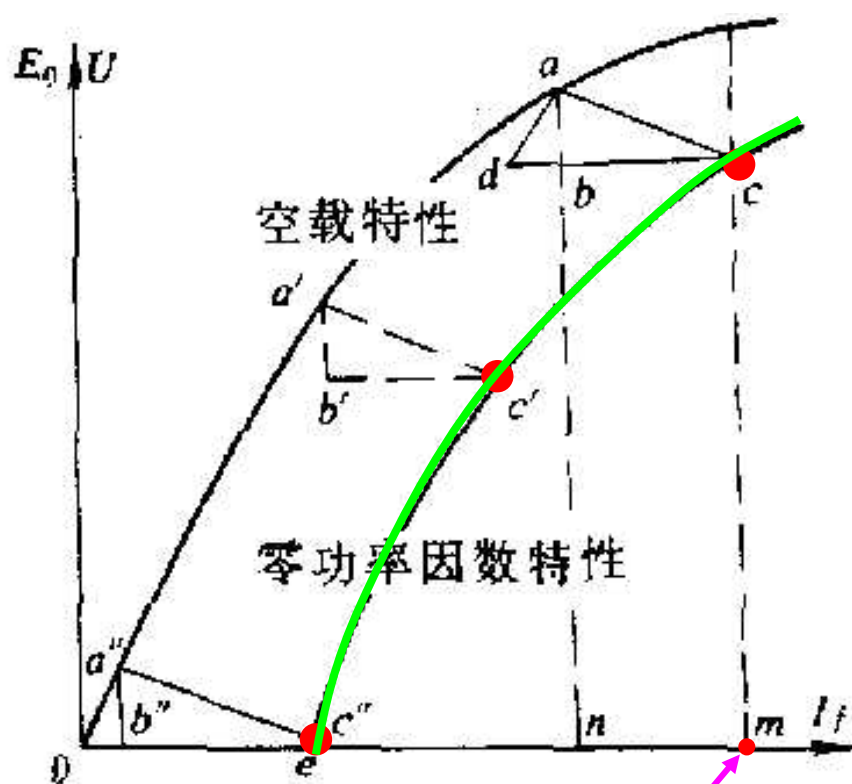
bn: 对应于端电压 U

bc=mn 且 bc//mn

c点: 对应于 $U = f(I_f)$ 为零功率因数特性曲线上一点

重点：空载特性 → 零功率因数曲线

$$F_{\delta} = F_f - k_{ad} F_{ad} \quad U = E_0 - Ix_s = E - Ix_{\sigma}$$



负载时实际励磁电流

电抗三角形abc

如电枢电流保持不变，三角形大小不变

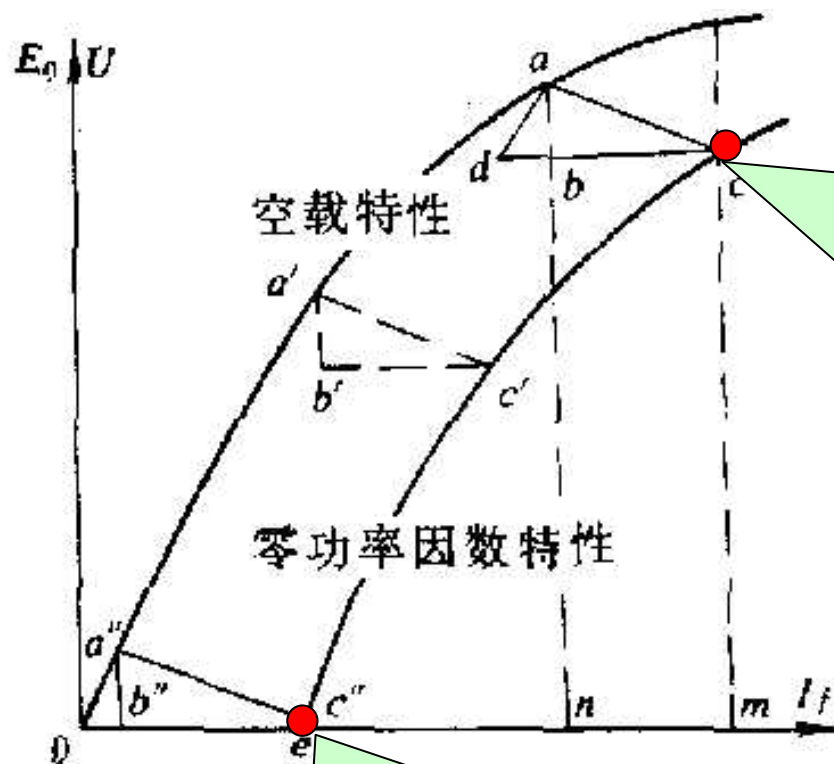
高 $ab = I_N x_{\sigma}$ ，底边 $bc = mn$ 均正比于电枢电流 I_N

c点轨迹即为零功率因数曲线

小容量电机实验方法：

电枢接一个可变三相纯电感负载，调节发电机 I_f 和负载，保证 $I = I_N$ ，记录不同励磁电流 I_f 下的电机端电压 U ，可得零功率因数曲线

大容量电机零功率因数曲线：两点实验法



额定电压点c点—($I=I_N, U=U_N$)
调节发电机处于过励，电枢电流为额定值，输出有功功率为0（零功率因数），励磁电流和额定电压决定c点

实际上要使 $\cos\theta=0$ 很难，只要保持 $\cos\theta < 0.2$ ，就能获得足够准确的结果

短路点e点—($I_k=I_N, U=0$)
调节发电机励磁电流，使三相稳定短路电流为额定值

9.同步发电机的参数及测定

- 同步电抗的测定
- 短路比
- 漏抗的测定和保梯电抗
- 转差法测定 x_d 和 x_q

I 同步电抗的测定

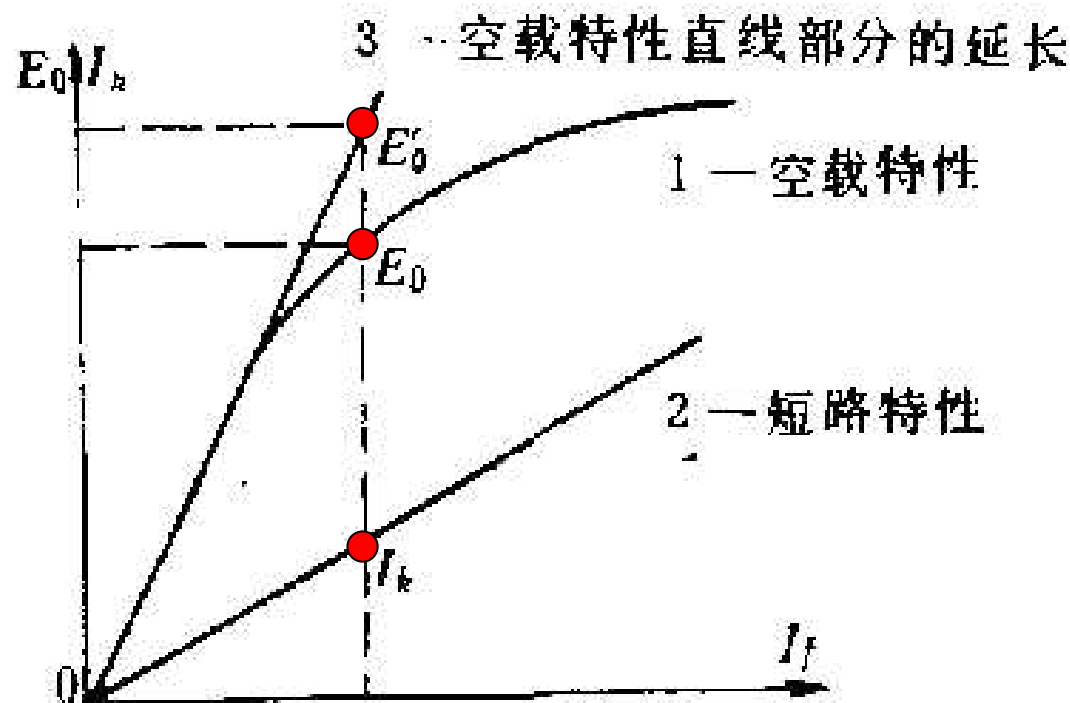
► 不饱和同步电抗

短路时不计饱和

$$\dot{E}_0 = j\dot{I}_k x_s = j\dot{I}_k x_d$$

$$x_d = x_s = \frac{E_0'}{I_k}$$

$$x_d^* = \frac{I_N x_d}{U_N} = \frac{I_N \left(\frac{E_0'}{I_k} \right)}{U_N} = \frac{E_0' / U_N}{I_k / I_N} = \frac{E_0'^*}{I_k^*}$$



凸极电机的交轴
同步电抗可以利用
经验公式求得：

$$x_q = 0.65x_d$$

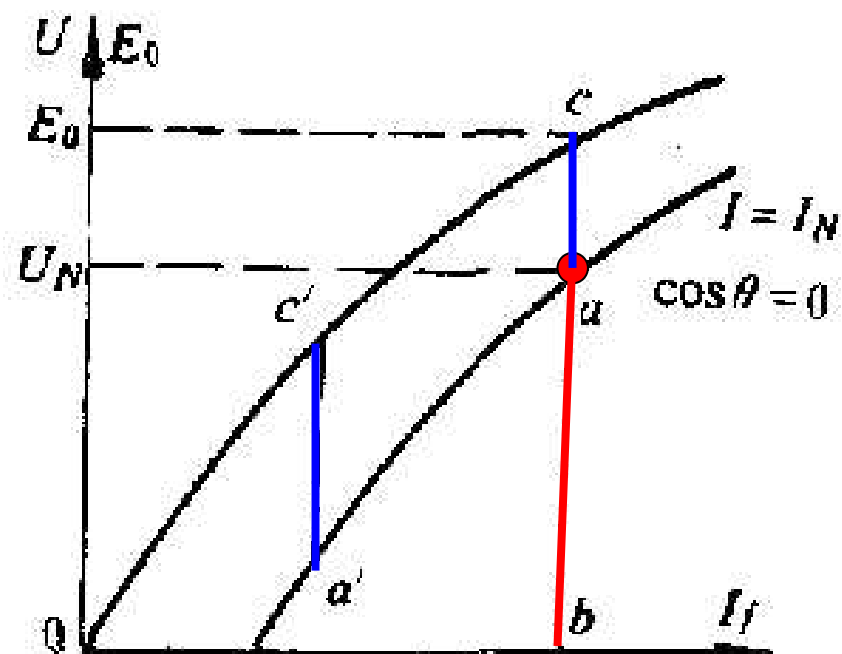
I 同步电抗的测定

➤ 饱和同步电抗

在纯感性负载时

$$E_0 - U = Ix_s$$

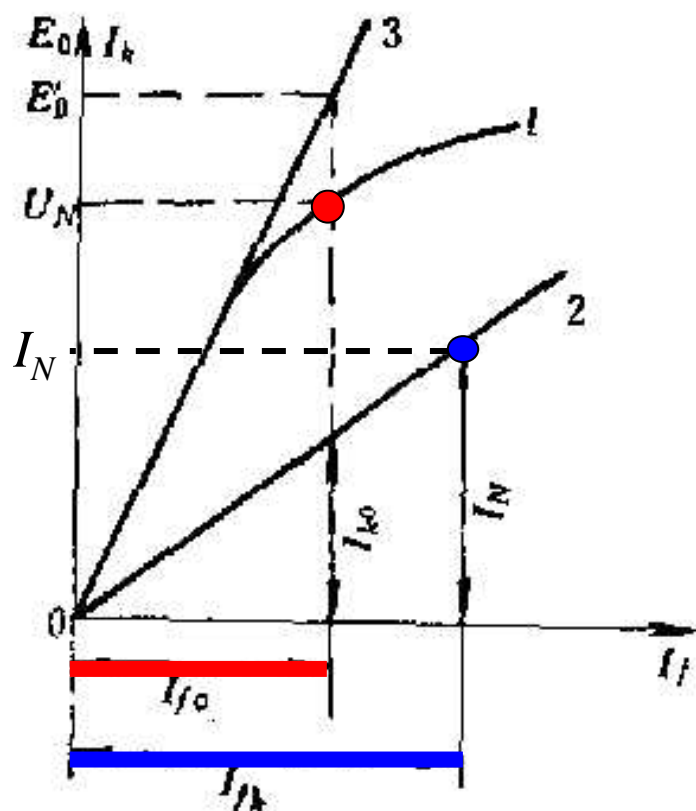
$$x_{s*} = \frac{x_s}{I_N} = \frac{I_N x_s}{U_N} = \frac{ca}{ab}$$



- 磁路饱和程度决定于空气隙中的合成磁场，若忽略漏阻抗压降，则决定于端电压
- 不同的端电压时， x_s 不同
- 磁路不饱和时，同步电抗电压 $c'a'$ 比 ca 大，即不饱和同步电抗的数值比饱和同步电抗的数值大

II 短路比

- 定义：在空载时使空载电动势 E_0 达到额定值 U_N 的励磁电流 I_{f0} ，与在短路时使电枢短路电流 I_k 达到额定值 I_N 的励磁电流 I_{fk} 之比



$$k_k = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I_{k0}}{I_N}$$

k_k 与 x_d 的关系

$$x_{d*} = \frac{E'_0}{I_{k0}} \times \frac{I_N}{U_N} = \frac{E'_0}{U_N} \times \frac{I_N}{I_{k0}} = C_0 \frac{1}{k_k}$$

$$C_0 = \frac{E'_0}{U_N} > 1$$

II 短路比

分析：短路比略大于不饱和同步电抗的倒数

- 短路比大，则同步电抗小，负载变化时发电机的电压变化就小，并联运行时发电机的稳定度较高；设计上，电机气隙较大，转子的额定励磁磁势和用铜量增大
- 短路比小，同步电抗大，负载变化时发电机的电压变化就大——电压调整率大，发电机的稳定度较差

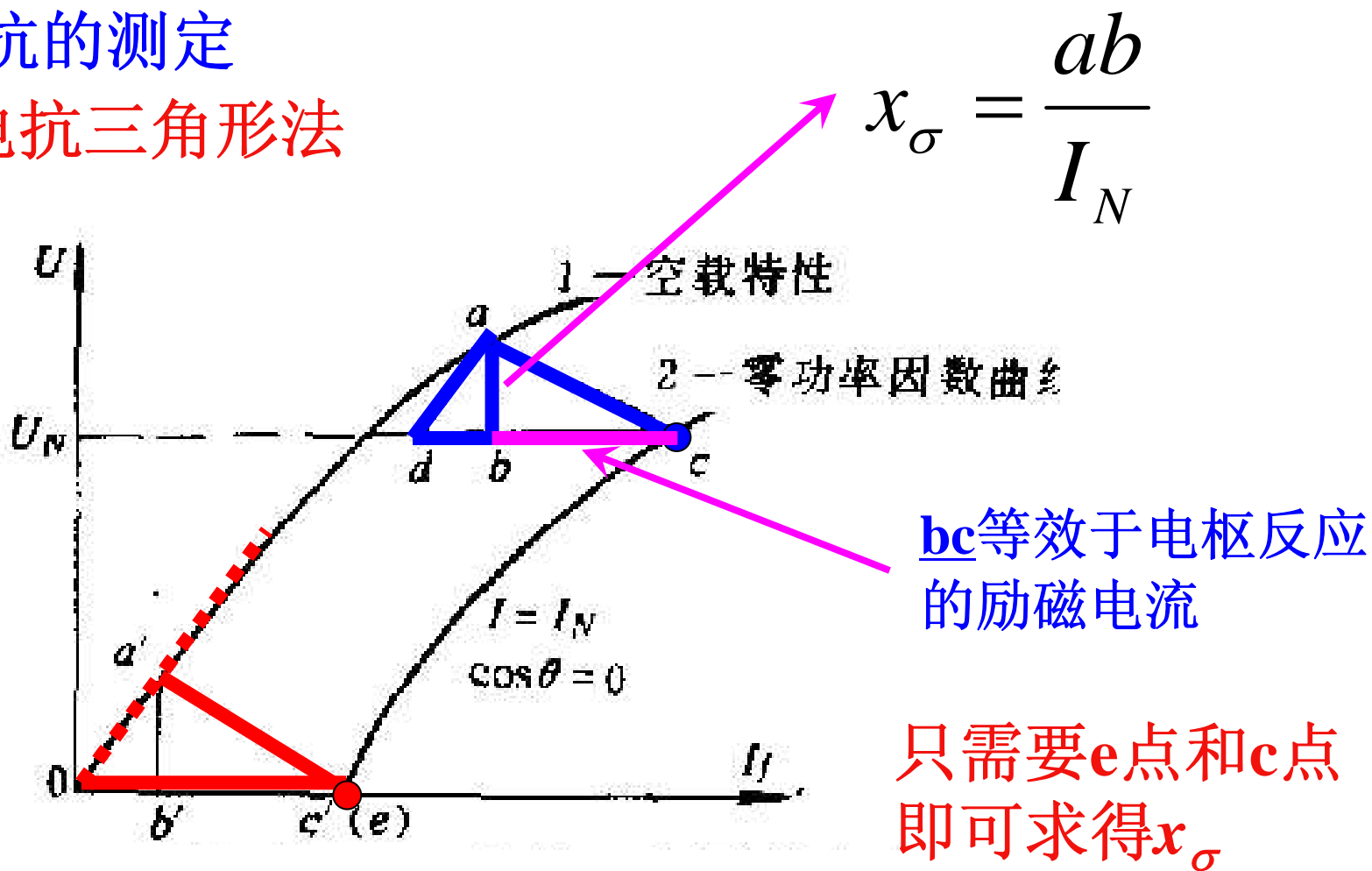
工程上：

- 随着单机容量的增大，为了提高材料利用率，随机组容量增大短路比降低
- 由于采用自动励磁调节装置，大大提高了运行稳定性，降低短路比可以提高电机经济指标

III 漏抗的测定和保梯电抗

➤ 漏抗的测定

(a) 电抗三角形法



III 漏抗的测定和保梯电抗

➤ 漏抗的测定

(b) 抽出转子法

- 抽出电机转子，定子绕组外施三相对称电压，使输入电流达到额定值（ $U=15\%\sim 25\%U_N$ ）
- 电压方程： $\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}(r_a + jx_\sigma) \approx 0$
- 忽略定子绕组电阻，则：

$$x_\sigma \approx \frac{U}{I}$$

- **特点：**实测值大于实际值—转子空间也归入了漏磁路，使总磁阻减小，表现漏抗增大。
- 可采用探测线圈修正

III 漏抗的测定和保梯电抗

► 保梯电抗 x_p

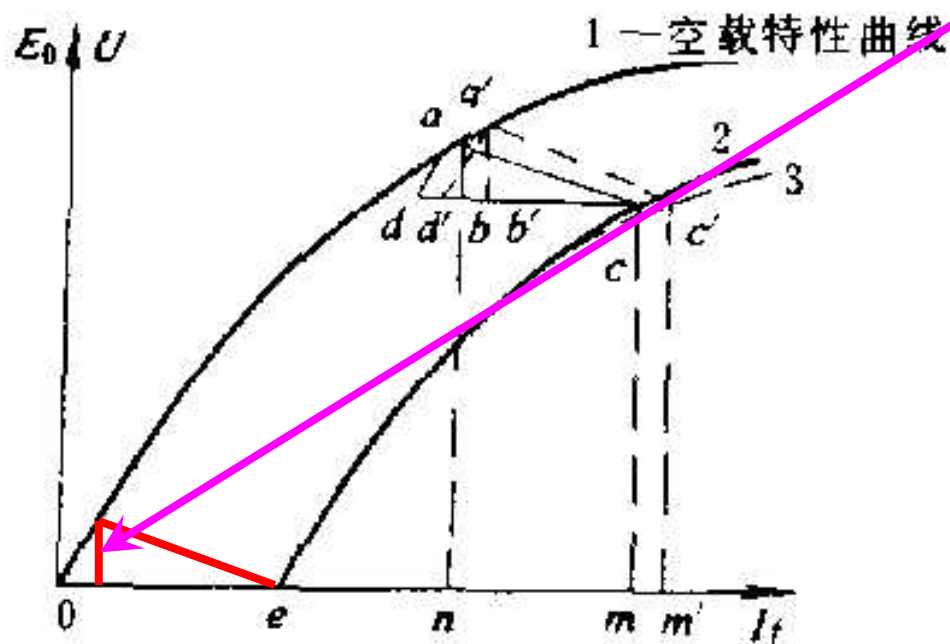


图 18-14 求保梯电抗

2 — 理论零功率因数曲线

3 — 实测零功率因数曲线

- 在三相稳态短路时，纵边为 $I_N x_\sigma$ — 短路三角形
- 随着电压增加，当考虑转子漏磁影响后，电抗三角形纵边并非恒定不变
- 对应于 $U = U_N$ ，边长为 $I_N x_p$ — 保梯(potier)三角形
- 零功率因数试验时，磁极漏磁较大，磁极饱和程度较空载时高，为此必须加大励磁
- 隐极发电机，极间漏磁通较小， x_p 近似等于 x_σ
- 凸极发电机， $x_p = (1.1-1.3) x_\sigma$

IV 转差法测定 x_d 和 x_q

- ▶ 同步电机由原动机带动，转速接近于同步转速，转子励磁绕组开路（不加励磁），在定子端子上外施对称三相电压。为了避免转子被牵入同步，外施电压约为额定电压的2%~5%，且使其相序能保证电枢旋转磁场的转向与转子的转向一致
- ▶ 调节原动机转速，使转差率小于1%，但不被牵入同步。此时，定子旋转磁场的轴线交替地与转子直轴和交轴重合

IV 转差法测定 x_d 和 x_q

- 当定子旋转磁场与转子直轴重合时，定子的电抗为 x_d ，此时电抗最大，定子电流最小，线路压降最小，端电压为最大
- 当定子旋转磁场与转子交轴重合时，定子的电抗为 x_q ，此时电抗最小，定子电流最大，线路压降最大，端电压为最小

因此：

$$x_d = \frac{U_{\max}}{I_{\min}} \quad x_q = \frac{U_{\min}}{I_{\max}}$$

为不饱和值， $x_q = 0.6x_d$

- 1 外施电压低，定子电枢磁场较小
- 2 无励磁电流，没有转子励磁磁场

IV 转差法测定 x_d 和 x_q

应用:

➤ d 轴:

- 正常运行时, 电机磁路饱和, d 轴气隙小而磁导大, 磁路饱和而使 x_d 减小, 分析时应采用饱和值;
- 短路时, 由于电枢反应的去磁作用, 使电机磁路处于不饱和状态, x_d 采用不饱和值;

➤ q 轴: 磁路气隙较长, 磁导小, 磁路不饱和, x_q 取不饱和值

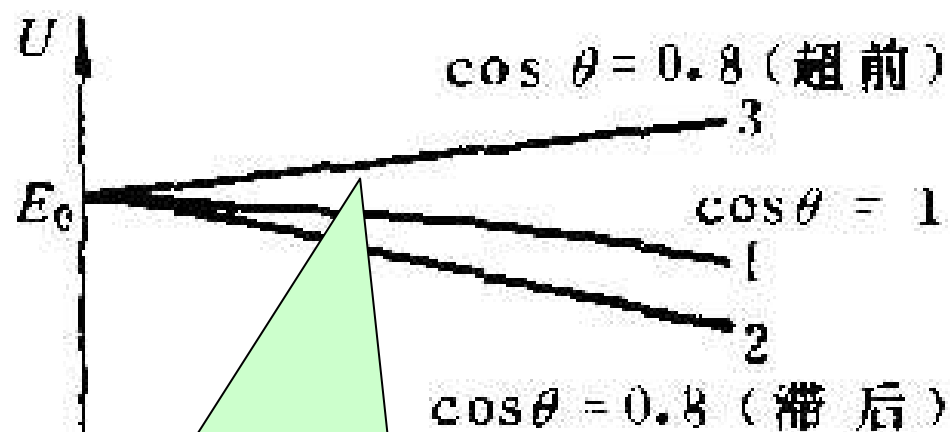
10. 同步发电机的稳态运行特性

- 外特性
- 电压变化率
- 求取电压变化率及额定励磁电流
- 调整特性
- 效率特性

I 同步发电机的外特性

定义:

外特性: $n=n_1, I_f=\text{const}, \cos\theta=\text{const}$, 发电机端电压 U 随负载电流 I 的变化关系 — 与负载性质有关



当容性负载且内功率因数超前时, 电枢反应是增磁作用, 外特性可以呈上升形状

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - (\dot{I}r_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q)$$

I_f 一定, 则 E_0 一定

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}r_a + j\dot{I}x_\sigma$$

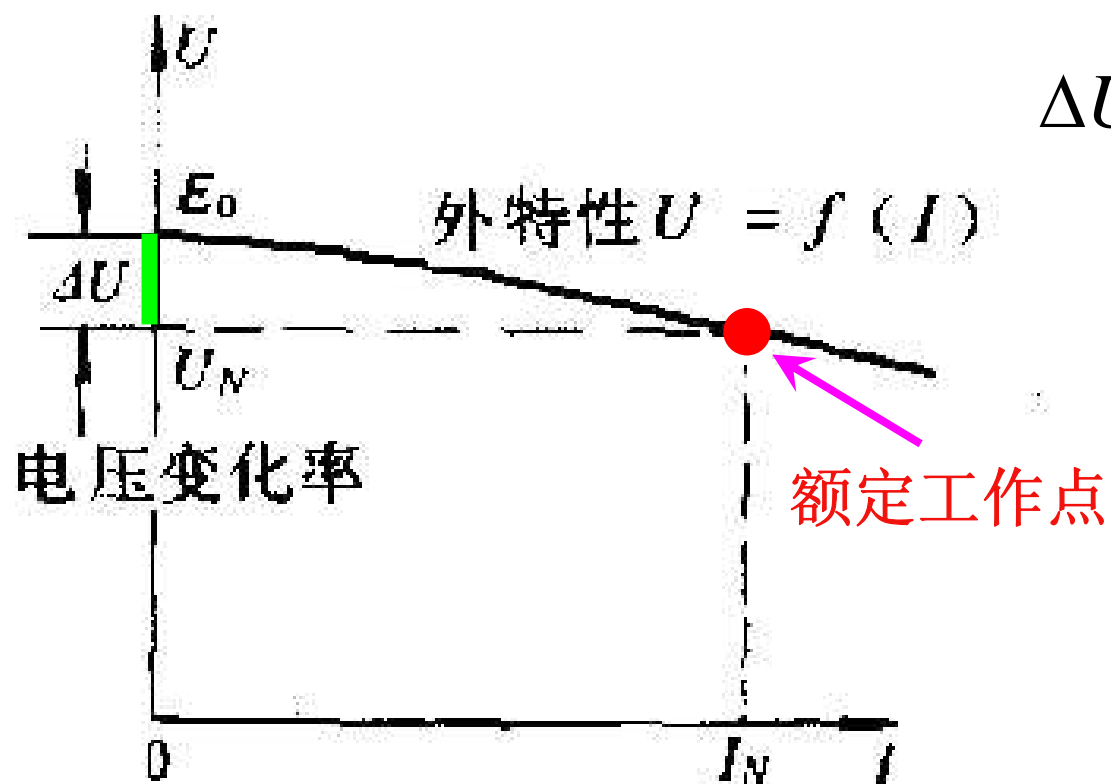
影响因素:

1. 电枢反应
2. 漏抗压降

II 同步发电机的电压调整率

➤ **额定工作状态**：发电机端电压为**额定值** U_N ，并输出额定负载（ $I = I_N$ ， $\cos\theta = \cos\theta_N$ ）

➤ **电压调整率**：保持额定运行时的励磁电流和转速不变，而卸去负载，则端电压 U 将发生变化



$$\Delta U \% = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

➤ ΔU 是发电机的性能指标之一，按国家标准规定应不大于**50%**

➤ 通过采用**快速自动电压调节器**，可以自动改变励磁电流使发电机端电压保持不变

III 求取 ΔU 及额定励磁电流

➤ 电势法求 $\Delta U\%$

➤ 磁势法求 $\Delta U\%$

1. 电势法求 $\Delta U\%$

➤ 从等效电路根据相量图分析

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} [r_a + j(x_a + x_\sigma)]$$

- 将电枢反应通过电枢反应电抗来反映
- 隐极同步发电机等效电路和相量图
- 凸极同步发电机等效电路和相量图
- 应采用饱和同步电抗值比较准确

2. 磁势法求 $\Delta U\%$

- 考虑了磁路的饱和情况，直接反映电枢磁势 F_a 的作用
- 电枢磁势 F_a 不分解为直轴和交轴分量，因此不考虑隐极式和凸极式电机的区别
- 不仅可求出和实际相符的电压变化率，而且可以求得发电机的额定励磁电流和从空载到满载时励磁电流的变化范围
- 用保梯电抗 x_p 代替漏抗 x_σ ，反映负载时转子漏磁的变化，并且不考虑电枢绕组电阻 r_a

$$\dot{E} = \dot{U}_N + \dot{I}_N r_a + j\dot{I}_N x_\sigma \approx \dot{U}_N + j\dot{I}_N x_p$$

2. 磁势法求 $\Delta U\%$

- 励磁绕组中的实际励磁电流为 I_{fN} ，可认为由两部分组成
- 产生气隙合成磁场所需的有效励磁电流 I'_{f0} ，对应于纯励磁磁势 F'_{f0}
 - 抵消额定电流 I_N 所产生的去磁电枢反应磁势(F_a 或 $k_d F_{ad}$)的励磁电流 I_{fa} ，其方向应与 I_N 相反

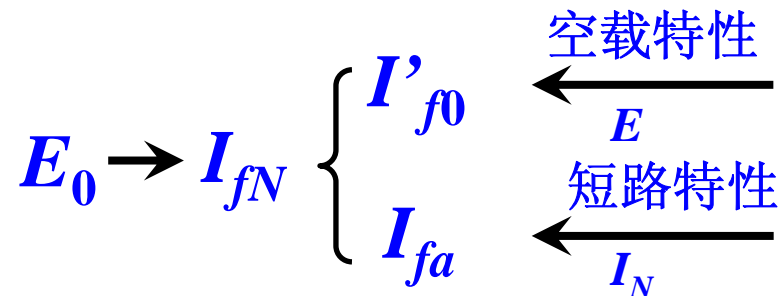
$$\dot{I}_{fN} = \dot{I}'_{f0} + \dot{I}_{fa}$$

- 励磁电流的相量相加，实际上反映了励磁磁势间的矢量相加

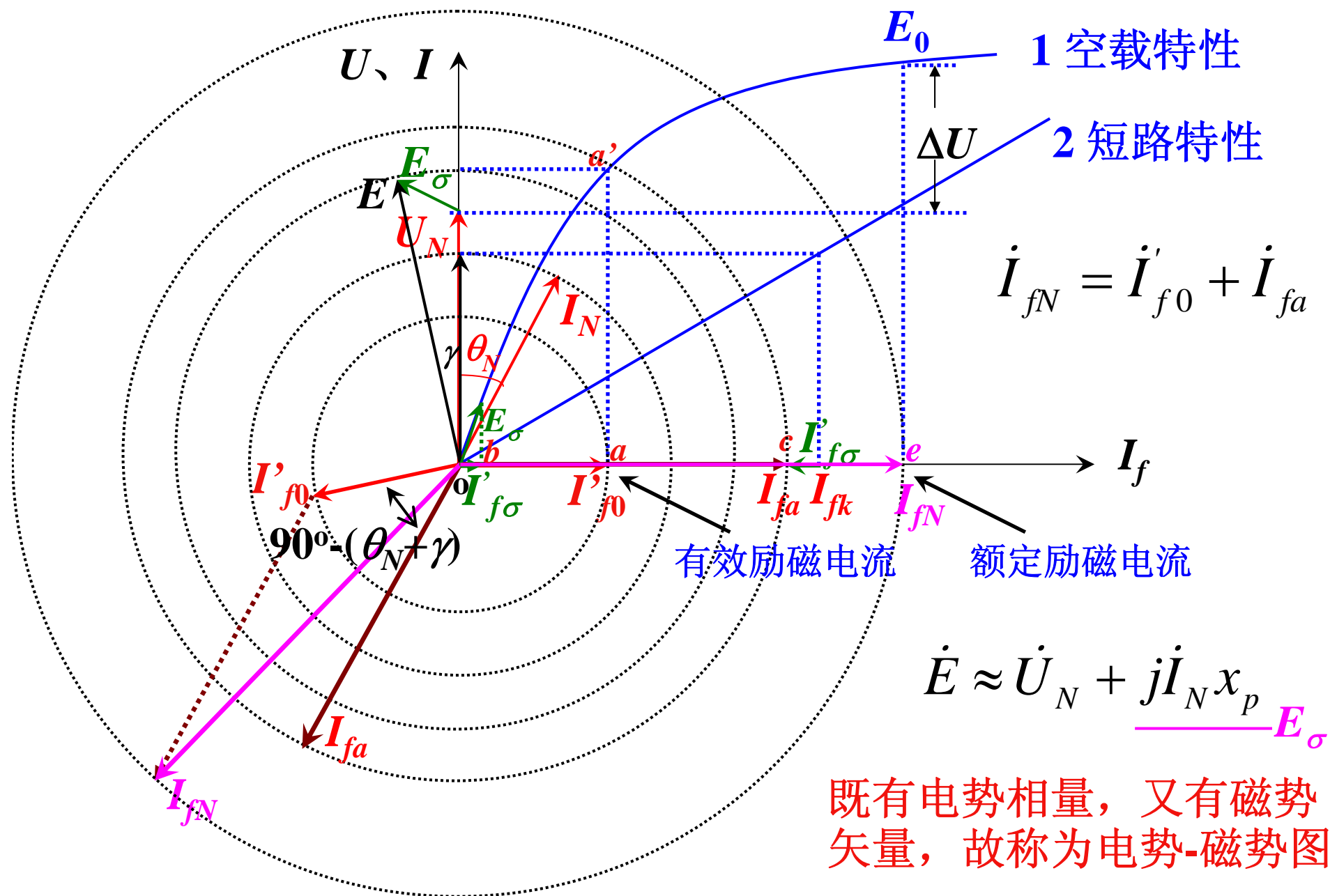
2. 磁势法求 $\Delta U\%$

➤ 求解思路:

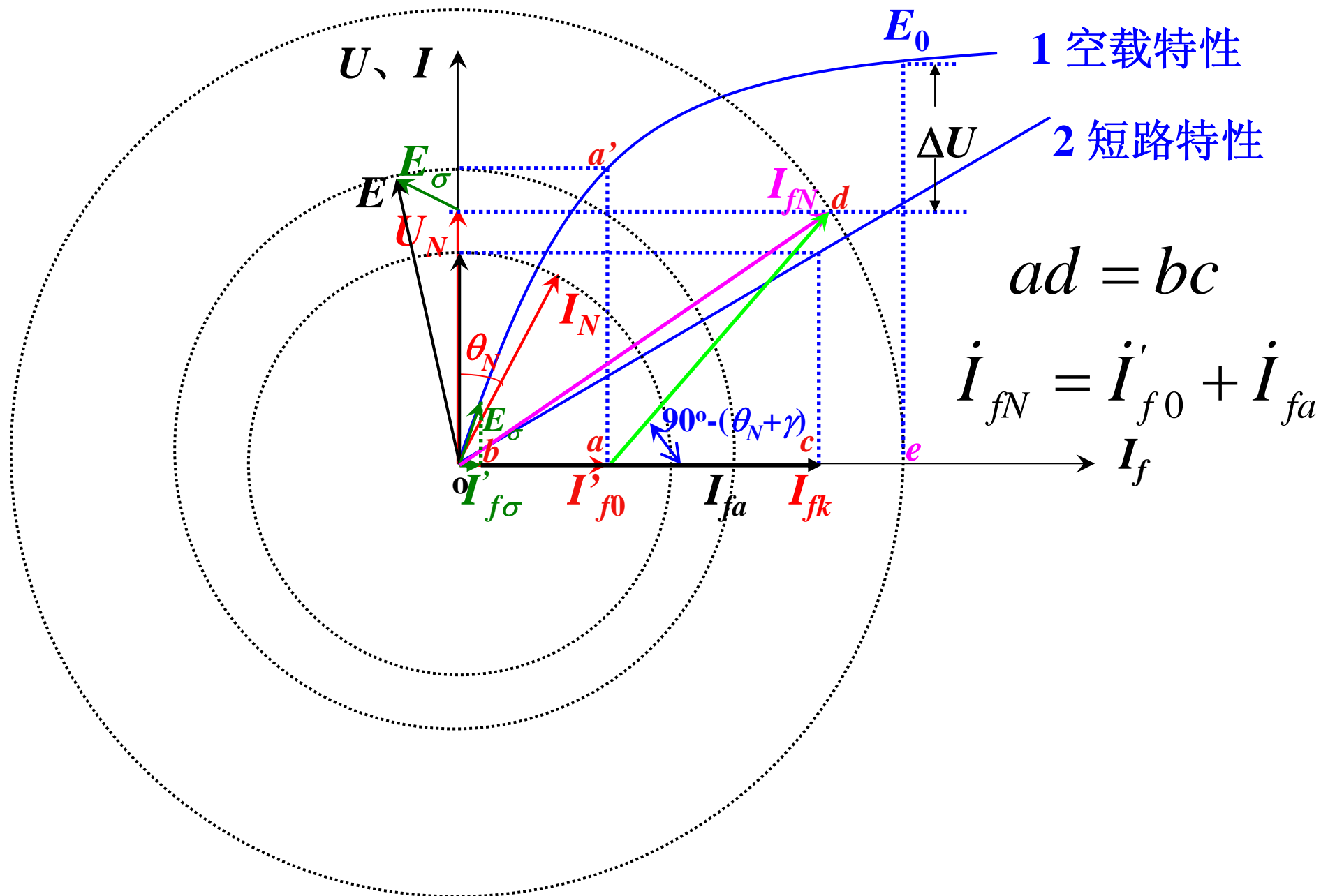
- 求 E_0 的关键其实是求额定励磁电流 I_{fN}
- I_{fN} 可看成由 I'_{f0} 和 I_{fa} 组成, 分别求出其大小和方向
- 求 I'_{f0} : 通过空载特性曲线找到合成电势 E 所对应的有效励磁电流
- 求 I_{fa} : 通过短路特性曲线找到负载额定电流 I_N 所对应的励磁电流 I_{fk} , 再除去漏抗电势 E_σ 对应的 $I'_{f\sigma}$



额定负载时 $U=U_N$, $I=I_N$, $\cos\theta=\cos\theta_N$, 已知电机参数 x_p



额定负载时 $U=U_N$, $I=I_N$, $\cos\theta=\cos\theta_N$, 已知电机参数 x_p



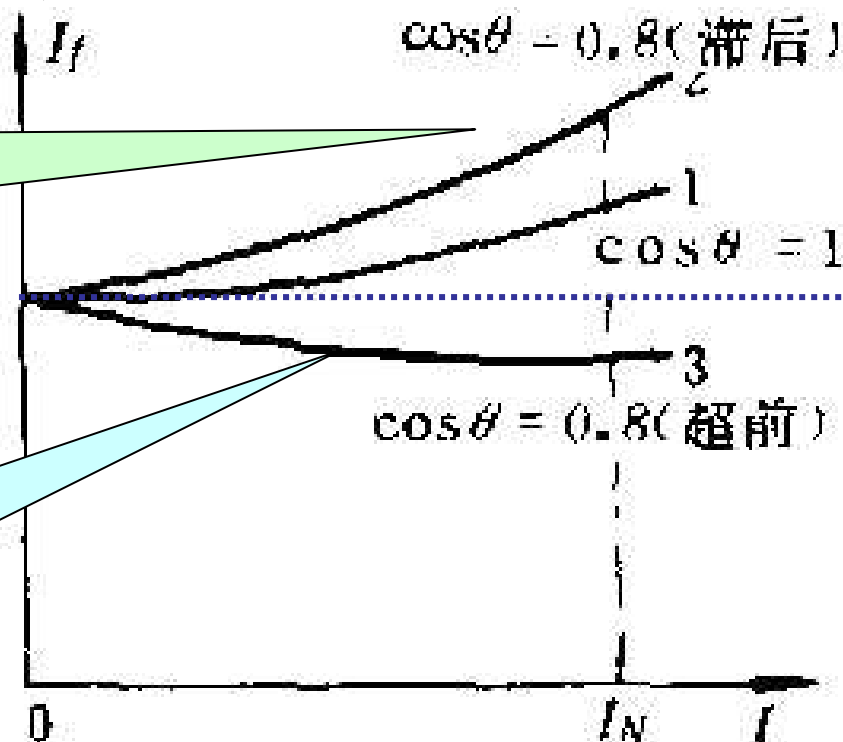
IV 同步发电机的调整特性

调整特性： $n=n_1$, $U=\text{const}$, $\cos\theta=\text{const}$, 负载电流 I 与励磁电流 I_f 的关系 — 与负载性质有关

物理意义： 维持发电机端电压不变，励磁电流需随负载电流的大小变化进行调节

在感性负载时，随负载增大，需增加励磁以抵消电枢反应的去磁作用

在容性负载时，随负载增大，需减小励磁以平衡电枢反应的增磁影响



V 同步发电机的效率特性

- 效率特性: $n=n_1$, $U=U_N$, $\cos\theta = \cos\theta_N$, 发电机效率 η 与输出功率 P_2 的关系, 即 $\eta = f(P_2)$
- 测量方法: 直接负载法、损耗分析法
- 损耗分析:
 1. 基本损耗: 电枢铁耗 p_{Fe} , 电枢铜耗 p_{Cua} , 励磁损耗 p_{Cuf} , 机械损耗 p_{mec}
 2. 杂散损耗: 漏磁引起的涡流损耗, 谐波引起的转子表面损耗等

V 同步发电机的效率特性

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} \right) \times 100\%$$

额定效率范围：

1 水轮发电机（空气冷却）：96%-98.5%

2 汽轮发电机（空气冷却）：94%-97.8%

同步电机的特性分析回顾

- **对称运行**：指电机转速为额定值且保持恒定，并供给三相对称负载时的一种**稳态运行**方式
- **主要变量**：电压 U 、电枢电流 I 、励磁电流 I_f 、功率因数 $\cos \theta$
- **主要参数**：同步电抗 x_s 、 x_d 、 x_q 、漏抗 x_σ 、 x_p

特性：

- (1) 空载特性： $U_0 = f(I_f)$ $I=0$
- (2) 短路特性： $I_k = f(I_f)$ $U=0$
- (3) 负载特性： $U = f(I_f)$ $I=\text{const}$ 、 $\cos \theta=\text{const}$
- (4) 外特性： $U = f(I)$ $I_f=\text{const}$ 、 $\cos \theta=\text{const}$
- (5) 调整特性： $I_f = f(I)$ $U=\text{const}$ 、 $\cos \theta=\text{const}$

作业

- 思考题: *p.251* 12-7~12-12
- 习题: *p.252* 12-5、12-7、12-8
- 要求: 绘出相量图, 说明参考相量。